

Eero Kotimäki

## **HYDRAULISEN PURISTIMEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS**

# **HYDRAULISEN PURISTIMEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS**

Eero Kotimäki  
Opinnäytetyö  
Kevät 2015  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka, auto- ja kuljetustekniikka

---

Tekijä: Eero Kotimäki

Opinnäytetyön nimi: Hydraulisen puristimen suunnittelu ja toteutus

Työn ohjaaja: Helena Tolonen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2015

Sivumäärä: 63 + 5 liitettä

---

Työssä suunniteltiin, valmistettiin ja koekäytettiin maaliteollisuuden parissa toimivan Xemec Oy:n sarjatuotantolinjaan tulevan hydraulinen puristin. Puristimelta vaadittiin 100 - 300 kN:n säädettävissä ja tarkkailtavissa oleva puristusvoima. Puristimen lisäksi suunniteltiin erilaisiin asennus- ja puristustehtäviin vaadittavat työkalut.

Tuotteen suunnittelussa pyrittiin käytännönläheiseen suoritustapaan eli tukeuduttiin todellisten, valmistettujen rakenteiden kuormitustesteihin ja simulointimalleista saatuihin tuloksiin pitkien laskutoimituksien sijaan. Käytettävissä olleessa prototyyppilaboratoriossa oli puristimia ja mittalaitteita, joilla voitiin suorittaa puristuskokeita ja mittauksia suunnittelun tueksi. Lopullinen tuote suunniteltiin sellaiseksi, että se voitaisiin tämän työn yhteydessä valmistaa ja koekäyttää.

Suunnittelu aloitettiin tarvittavan puristusvoiman ja geometrysten rajoitteiden määrittämisellä. Suunnittelu- ja mitoitus työ tehtiin valtioneuvoston asetusta 12.6.2008/400 ja valmistukseen sekä käyttöön liittyviä standardeja SFS-EN 349+A1 ja SFS-EN 693+A2 noudattaen. Rungon lujuustarkastelu suoritettiin käyttäen Solid Edge -mallinnusohjelman simulointityökaluja, joiden ilmoittamia kuormitustilanteissa syntyviä rakenteen siirtymiä verrattiin todellisessa rakenteessa syntyviin siirtymiin. Työn tuloksena saavutettiin toimiva, käyttäjilleen turvallinen puristin työkaluineen, jolla pystyttiin suorittamaan vaaditut kappaleiden asennus- tai kokoonpanotehtävät.

---

Asiasanat: hydraulijärjestelmät, lujuusoppi, koneensuunnittelu, simulointi, turvallisuusmääräykset

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
School of Engineering and Natural Resources, Vehicle and Transportation Engineering

---

Author: Eero Kotimäki

Title of thesis: Development and Manufacturing of Hydraulic Shop Press

Supervisor: Helena Tolonen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2015

Pages: 63 + 5 appendices

---

This bachelor thesis describes the common process of engineering mechanical devices. The objective of this thesis was to develop and manufacture a fully functional device, which was supposed to be a part of production line of Xemec Oy. Xemec Oy is a company which is specialized in development of automated devices for paint industry. While development, manufacturing, sales, distribution and service are located in the same building, the company offers a great environment for learning mechanical engineering and product development.

The product of this thesis was a hydraulic ram, which was used to install components and secure their mechanical connection. It had requirement of adjustable 100 - 300 kN pushing force. The current laws and legislation of the safety of devices were used as a basement for the development. The whole design and drawings used in this project were created with Solid Edge 3D-design software. The stiffness of the ram frame was ensured by using an FEM-simulation add-on for Solid Edge.

As a result, the production line was equipped with a customized, fully-working hydraulic ram which was safe to use in all applied conditions. In addition, the required tools for current processes were made.

---

Keywords: hydraulic engineering, strength of materials, mechanical engineering, simulation

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 SUUNNITTELUUN VAADITTAVIEN LÄHTÖTIETOJEN MÄÄRITTELY	8
2.1 Työkappaleiden geometriset vaatimukset	9
2.2 Puristimelta vaadittava voima	9
2.3 Koneensuunnitteluun ja puristimen käyttöön liittyvät vaatimukset	10
3 KONEEN ALUSTAVA SUUNNITTELU	13
3.1 Rakenteen hahmottelu	13
3.2 Materiaali- ja komponenttivalinnat	14
3.3 Käyttölaitteen muutokset	16
3.4 Koneen riskianalyysi	18
3.4.1 Puristumis-, leikkautumis- tai viiltovaara	18
3.4.2 Korkeapaineisen nesteen suihkun tai tunkeutumisen vaara	19
3.4.3 Sähköstä johtuvat vaarat	19
3.4.4 Melun aiheuttama vaara	19
3.4.5 Työkappaleiden tai työkalujen putoaminen tai niiden osien sinkoaminen	20
3.5 Turvallisuusmääräysten vaikutus	20
4 RAKENTEEN JA HYDRAULIIKAN DETALJISUUNNITTELU	22
4.1 Rakennesuunnittelu	22
4.1.1 Laserleikkaus valmistusmenetelmänä	22
4.1.2 Sovitevälyksen aiheuttama mittaepätarkkuus	24
4.1.3 Rakenteen 3D-mallin luonti	29
4.2 Hydraulikkajärjestelmä	33
4.3 Työkalut	38
4.4 Työkalujen kiinnitys	39
4.5 Pintakäsittely	40
5 RAKENTEEN LUJUUSTARKASTELU	41
5.1 Elementtimenetelmä	41

5.2 FEM-analyysi	43
5.3 Hitsin mitoitus	49
6 KONEEN VALMISTUS JA KOKOONPANO	51
6.1 Valmistuksen ja kokoonpantavuuden huomiointi	51
6.2 Osapiirustusten luonti	52
6.3 Komponenttien tilaus	52
6.4 Komponenttien tarkistus ja kokoonpano	53
7 FEM-ANALYYSITULOSTEN JA TODELLISTEN MITTAUSTEN VERTAILU	54
8 KÄYTTÖ JA TURVALLISUUS	59
9 YHTEENVETO	60
LÄHTEET	62
LIITTEET	64

# 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä esitellään sarjatuotantokäyttöön tulevan hydraulikkatoimisen puristimen suunnitteluun ja valmistukseen liittyvät työvaiheet. Työssä selvitetään hydraulisen puristimen suunnitteluun ja käyttöönottoon liittyvä lainsäädäntö ja määräykset, joihin koneen rakenteen ja toimintojen suunnittelu pohjautuu. Rakenteelle suoritetaan lujuusanalyysi käyttäen simulointiohjelmistoja ja simuloinnin todenmukaisuutta tutkitaan vertaamalla saatuja tuloksia todellisiin mittauksiin.

Puristin suunnitellaan sellaiseksi, että se toimii mahdollisimman tehokkaasti osana maaliteollisuuden parissa toimivan Xemec Oy:n laitevalmistuksen sarjatuotantolinjaa. Puristimen tulee soveltua useiden erilaisten komponenttien asennukseen ja kokoonpanoon, joten siltä vaaditaan säädettävyyttä ja muokattavuutta. Puristimen tarve syntyi yrityksen toiminnan laajennuksen myötä sekä halusta parantaa tuotannon tehokkuutta ja laatua.

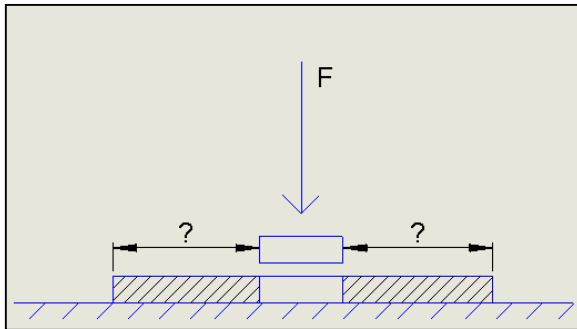
Markkinoilla on useita eri valmistajan tarjoamia valmiita puristinkoneistoja. Tätä opinnäytetyötä edeltävän selvitystyön perusteella havaittiin, etteivät valmiit konstruktiot sellaisenaan olisi käyttötarkoituksen mukaisia. Useimmissa tapauksissa laitteiston fyysinen koko tai hankintahinta olisi kohtuuton käyttötarkoitukseen nähden. Todettiin, että on toiminnan kannalta järkevämpää ja taloudellisempaa suunnitella alusta alkaen täysin yrityksen tuotantolinjaa varten räätälöity laite, kuin yrittää muokata kaupallisia laitteita tuotantolinjalle sopivaksi.

Työssä saatetaan laitteen suunnitteluprosessi sille tasolle, että se voidaan valmistaa ja kokoonpanna toimeksiantajan prototyypilaboratoriossa. Prototyypille suoritettavien koekäytön ja mittauksien jälkeen koneen on tarkoitus päätyä tuotantotyöntekijöiden käyttöön.

## 2 SUUNNITTELUUN VAADITTAVIEN LÄHTÖTIETOJEN MÄÄRITTELY

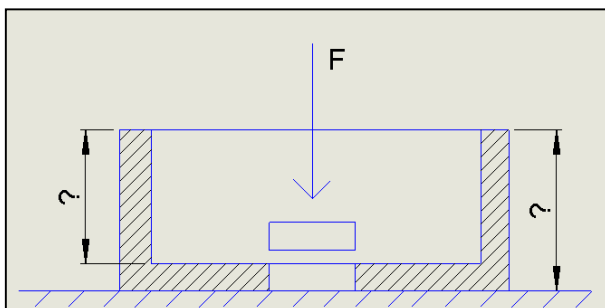
Puristimen on tarkoitus korvata useita käsikäyttöisillä laitteilla tehtäviä työvaiheita. Vaatimusten selvittäminen täytyi tehdä sen varmistamiseksi, että puristimella on mahdollista tehdä kaikki sille määrätty työvaiheet. Vaatimusten määrittely alkoi tuotantoon tuleviin laitteisiin ja kokoonpanoihin perehtymällä.

Laitteista selvitettiin yksittäisten osien ja kokoonpanojen geometriset mitat piirustuksista ja 3D-malleista. Havaittuja puristimen rakenteeseen vaikuttavia tekijöitä olivat työkohdan etäisyys kappaleen reunasta ja puristustyöhön tarvittava voima (kuva 1).



KUVA 1. Työpisteen etäisyys kappaleen reunoista

Työstettävien kappaleiden leveyden lisäksi täytyi tietää kappaleiden syvyys-suuntainen työpisteen etäisyys kappaleen reunoista. Työkalun täytyi ulottua työpisteeseen osumatta työkappaleen rakenteisiin (kuva 2).



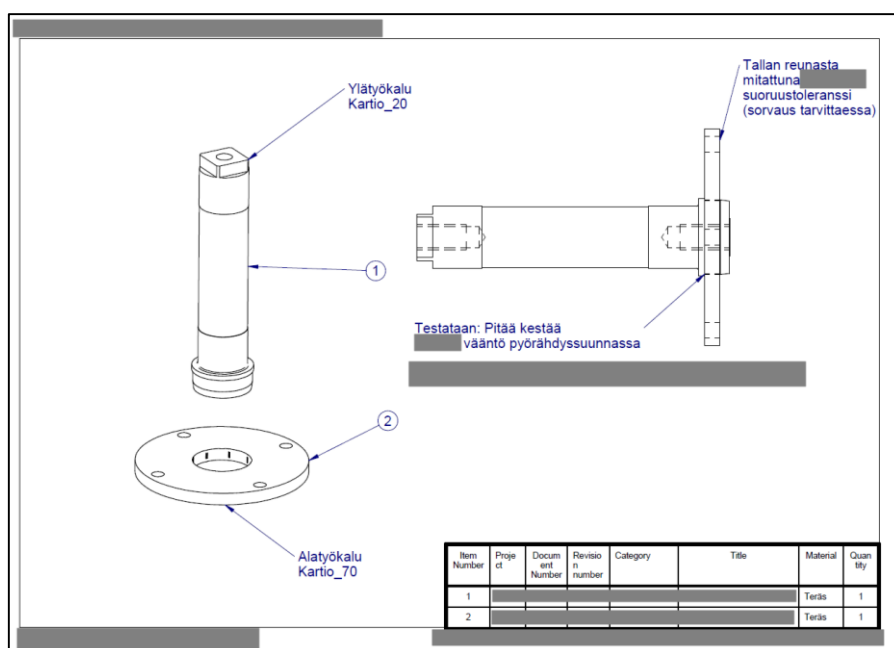
KUVA 2. Työkohdan sijainti syvyys suunnassa kappaleeseen nähden



## 2.1 Työkappaleiden geometriset vaatimukset

Työkappale täytyy pystyä asettamaan puristimeen aina siten, että ylä- ja alatyökalut osuvat keskelle työpistettä ilman, että työkappale osuu puristimen tukirakenteisiin. Työpisteellä tarkoitetaan tässä tapauksessa pistettä, jossa puristus tapahtuu. Tämän takia puristimen tukirakenteiden täytyy olla riittävän kaukana työpisteestä. Liian leveä rakenne veisi kuitenkin vain turhaa tilaa, aiheuttaisi lisää valmistuskustannuksia ja lisäisi vaadittavien tukirakenteiden määrää.

Pienimmän mahdollisen rakenteen leveyden selvittämiseksi tutkittiin puristimen avulla valmistettavien kappaleiden ja kokoonpanojen geometrisiä ulkomittoja. Kappaleiden joukosta poimittiin aluksi kaikkein pisimmät, leveimmät ja korkeimmat kappaleet tai kokoonpanot. Näiden perusteella määritettiin puristimen tukirakenteiden pienin mahdollinen etäisyys työpisteestä. Kuvassa 3 esitetään esimerkki puristimella suoritettavan työvaiheen kokoonpanopiirustuksesta.



KUVA 3. Esimerkki puristimen avulla liitettävistä kokoonpanoista, kuvasta piilotettu mitta- ja tunnistetiedot

## 2.2 Puristimelta vaadittava voima

Puristimella tullaan suorittamaan hyvin erilaisia puristusvoimia tarvitsevia asennuksia. Puristimella muun muassa asennetaan laakereita, puristetaan niittejä ja

asennetaan puristussovitteella toisiinsa kiinnittyviä kappaleita. Asennettavien laakereiden koko vaihtelee kokoonpantavassa laitteessa ulkohalkaisijaltaan 10 mm:n laakereista 62 mm:n laakereihin. Asennustöiden lisäksi puristimella voidaan tehdä materiaalin muodonmuutokseen perustuvia liitoksia.

Laakereiden tai muiden puristussovitteella asennettavien kappaleiden asennukseen vaadittava puristusvoima ei kuitenkaan ole suoraan riippuvainen laakerin mitoista, vaan laakerin asennuskohtaan mitoitettun sovitteen tiukkuudesta. Liiallisella voimankäytöllä voi helposti aiheuttaa asennettavaan kappaleeseen vahinkoa. Laakereiden osat voivat vaurioitua, puristettavaan kappaleeseen voi tulla epätoivottuja muodonmuutoksia tai säröjä tai puristettava kappale voi mennä määritettyä asennusmittaa syvemmälle. Tästä syystä puristimen tuottamaa voimaa on pystyttävä säätämään ja tarkkailemaan työn aikana. Puristimen voiman tarve arvioitiin normaalikäytössä olevan 10 - 200 kN ja suurin puristimelta koskaan vaadittava voima arvioitiin olevan 300 kN.

### **2.3 Koneensuunnitteluun ja puristimen käyttöön liittyvät vaatimukset**

Puristin täytyy suunnitella sellaiseksi, että puristimen käyttöön riittää yksi henkilö, joka pystyy suorittamaan kulloisenkin työvaiheen tehokkaasti ilman liiallista tapaturmariskiä. Lisäksi koneelle on selvitettävä varotoimenpiteiden tarve muun muassa hätätilanteiden varalle sekä koneen luotettava energiansyötön katkaisu huolto- tai vikatilanteissa. Koneen huollettavat kohteet on määriteltävä ja niiden luoksepääsy täytyy varmistaa. Hydraulinen puristin määritellään koneeksi valtioneuvoston asetuksen 12.6.2008/400 seuraavasti (1, § 4):

”Koneella tarkoitetaan toisiinsa liitettyjen osien tai komponenttien yhdistelmää, jossa on tai joka on tarkoitettu varustettavaksi muulla kuin välittömällä ihmis- tai eläinvoimalla toimivalla voimansiirtojärjestelmällä ja jossa ainakin yksi osa tai komponentti on liikkuva ja joka on kokoonpantu erityistä toimintoa varten.”

Vuodesta 1994 alkaen uusien koneiden on täytettävä valtioneuvoston päätöksessä 1314/1994 koneiden turvallisuudesta esitetyt vaatimukset. Konepääätöksen noudattamisesta ja soveltamisesta vastuu kuuluu ensisijaisesti valmistajalle, valmistajan edustajalle tai muulle käyttöönluovuttajalle. (2, s. 5.)

Koneen valmistukseen liittyy seuraavia lakisääteisiä tehtäviä (2, s. 6):

- Arvioidaan koneen vaaroihin liittyvät riskit.
- Selvitetään konetta koskevat turvallisuusvaatimukset.
- Suunnitellaan ja rakennetaan kone olennaisten turvallisuusvaatimusten mukaisesti.
- Laaditaan käyttöohjeet ja tehdään koneeseen tarvittavat merkinnät.
- Laaditaan tekninen tiedosto.
- Tehdään vaatimustenmukaisuusvakuutus.
- Kiinnitetään CE-merkintä.

Koneensuunnittelussa kone pyritään tekemään mahdollisimman turvalliseksi kolmivaiheista menetelmää käyttäen. Ensimmäisessä vaiheessa pyritään suunnittelemaan koneen rakenteet sellaisenaan turvalliseksi. Jos koneen rakennetta ei sen toimintojen vuoksi voida suunnitella vaarattomaksi, pyritään vaarat poistamaan turvallisuustekniikan avulla siten, että laitteeseen lisätään suojuksia ja turvalaitteita, jotka vähentävät koneen käyttöön liittyviä riskejä. Mikäli näiden vaiheiden jälkeen koneeseen jää vaaratekijöitä, joita ei voida eliminoida, täytyy koneen vastaanottajalle ilmoittaa näistä koneen mukana toimitettavassa käyttöohjeessa. Lisäksi mahdollisesta erikoiskoulutuksen tarpeesta tai henkilösuojainten tarpeesta on ilmoitettava koneen käyttäjälle. (2, s. 8.)

Puristimen ensimmäistä tuotettavaa versiota käsitellään prototyyppinä, jolloin konetta voidaan koekäyttää eikä sitä saa vielä varustaa CE-merkinnällä (2, s. 45). Tietyille koneille täytyy muiden vaatimusten lisäksi suorittaa tyyppitarkastus. Tyyppitarkastukseen kuuluviksi koneiksi luokitellaan ”kylmänä tapahtuvaan metallintyöstöön tarkoitetut puristimet, sekä särmäyspuristimet, joissa aines syötetään tai poistetaan käsin, ja joiden liikkuvien osien liike saattaa ylittää 6 mm ja nopeus saattaa ylittää 30 mm/s”. Tyyppitarkastuksen suorittaa hakemuksessa ilmoitettu valvontaviranomaisten hyväksymä laitos. Tällaisia Suomessa toimivia laitoksia ovat muun muassa VTT, Inspecta OY ja SGS FIMKO Oy. (2, s. 82 - 94.)

Ennen koneen saattamista markkinoille on koneesta laadittava tekninen rakennetiedosto, jossa osoitetaan koneen vaatimuksenmukaisuus. Tekninen rakennetiedosto on oltava yksittäiselle koneelle kansallisten viranomaisten saatavilla

vähintään 10 vuoden ajan koneen valmistuspäivämäärästä. Rakennetiedosto tulee laatia määräyksien mukaiseksi, mutta rakennetiedoston ei tarvitse olla kokonaan kirjallisessa muodossa. Valmistajan on kohtuullisessa määräajassa pystyttävä kokoamaan vaatimusten mukainen rakennetiedosto viranomaisten sitä vaatiessa. Tähän nojaten puristimelle ei vielä suunnitteluvaiheessa laadittu kirjallista rakennetiedostoa. (2, s. 10.)

Valtioneuvoston päätöksen numero 856 luvun 5 momentin 75 mukaan koneen valmistajan täytyy määritellä puristimen hydrauliselle tai pneumaattiselle järjestelmälle määräajoin suoritettavan tarkastuksen kohteet (2, s. 96). Huoltotarkistukset ja toimenpiteet esitellään luvussa käyttö ja turvallisuus.

Koneissa on mahdollisuuksien mukaan käytettävä turvakomponentteja riskien pienentämiseksi. Turvakomponentiksi luokitellaan sellainen täydellinen kokoonpano, joka voidaan liittää koneeseen ja joka asennettuna poistaa koneen suunnittelussa havaitun vaaran tai pienentää niiden aiheuttamaa riskiä. Turvalaite ei kuitenkaan saa olla sellainen, että se asennettuna hankaloittaisi merkittävästi koneen käyttöä tai aiheuttaisi lisävaaraa. (2, s. 26.)

Kun kone täyttää sille asetetut vaatimukset, tulee koneen valmistajan tai tilaajan laatia allekirjoituksella ja päiväyksellä varustettu vaatimustenmukaisuusvakuutus. Vakuutuksen allekirjoittaja on vastuussa koneesta ilmoitettujen tietojen oikeellisuudesta. (2, s. 46.)

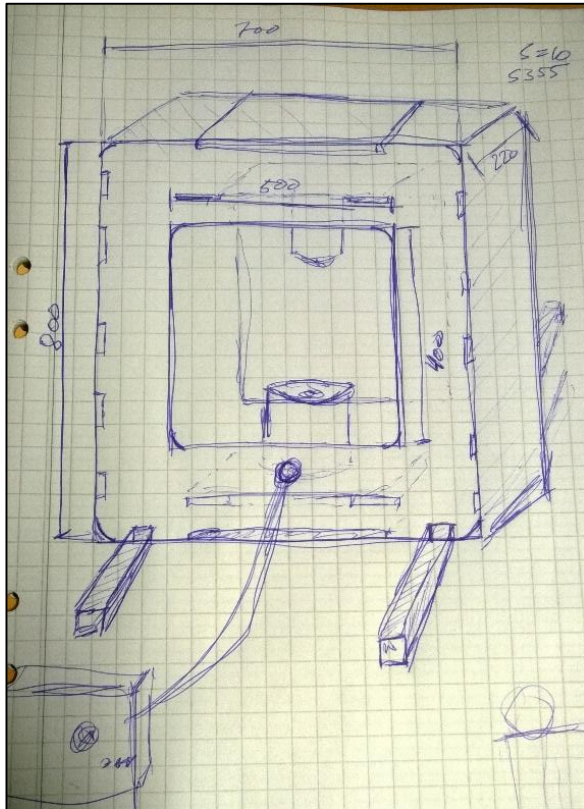
### **3 KONEEN ALUSTAVA SUUNNITTELU**

Aikaisempi kokemus tuotteiden kokoonpanossa on osoittanut, että puristus-asennusten onnistumisen kannalta kappaleen keskittäminen ja työkalujen liikkeiden kohtisuoruus toisiinsa nähden on ensiarvoisen tärkeää. Tästä syystä puristimen rakenne pyrittiin pitämään kaikilta osin syntyviin voimiin nähden symmetrisenä, jolloin rakenteen mahdolliset muodonmuutoksetkin olisivat symmetrisiä.

Epäsymmetriset muodonmuutokset rakenteessa aiheuttaisivat herkästi poikkeamaa työkalujen keskipisteiden keskeisyydessä tai työkalun varsien kohtisuoruudessa. Avonaisilla rakenteilla epäsymmetristen muodonmuutosten syntymisen estäminen olisi haasteellista, joten perusrakenteesta päätettiin tehdä suljettu kehikko.

#### **3.1 Rakenteen hahmottelu**

Rakenteen hahmottelu aloitettiin perinteisin menetelmin paperille, mutta sopivan yksinkertaisen rakenteen löydyttyä rakenteen piirteitä alettiin laatia Siemensin Solid Edge -mallinnusohjelmaa käyttäen. Hydraulikkasyylinteri sijoitettiin puristimen rungon alaosaan, jotta männän paluuliike tapahtuisi painovoiman avulla eikä sylinteri tarvitsisi erillisiä palautinjousia. Sylinterin käyttölaite sijoitettiin rungosta ergonomiasyistä erilleen, jotta asettelu voidaan mukauttaa sopivaksi käyttökokemusten perusteella. (Kuva 4.)



KUVA 4. Puristimen alustava malli päämittoineen

Koska eri menetelmät tarvitsevat erilaisia työkaluja, täytyi puristimeen suunnitella ylä- ja alatyökaluille pitimet, joihin työkalun vaihto olisi helppoa ja nopeaa. Puristimen työtasoista päätettiin tehdä kiinteät, koska useimmissa kaupallisissa puristimissa etenkin työtason säätö aiheuttaa haitallista väljyyttä rakenteeseen. Työkalunpitimiä päällekkäin pinoamalla voi tarvittaessa säätää työkalujen etäisyyttä toisistaan sylinterin ollessa täysin kiinni.

### 3.2 Materiaali- ja komponenttivalinnat

Rungon materiaaliksi valittiin alustavasti rakenneteräs S355 sen hyvän saatavuuden, lujuuden ja käyttöominaisuuksien vuoksi. Materiaalin paksuudeksi valittiin alustavasti 10 mm ja sitä päätettiin muuttaa myöhemmin ohuemmaksi tai paksummaksi tarpeen mukaan. Lisäksi materiaalia voidaan tarvittaessa hitsata tai siihen voidaan tehdä kierteitettyjä reikiä.

Varastossa oli kolme erilaista ylimääräiseksi jäänyttä tai toteutumatta jäänyttä projektia varten hankittua hydraulikkasynteriä käyttölaitteineen. Selvitettiin, voisiko jotain näistä sylintereistä käyttää puristimessa. Ensimmäinen sylinteri oli

perinteisen halkomakoneen sylinteri, joka maksimivoiman puolesta olisi soveltunut hyvin tähän tarkoitukseen. Sylinterissä havaittiin kuitenkin männänvarressa selkeä säteittäinen välys, mikä haittaisi työkalujen keskittämistä. Toisen sylinterin iskunpituus oli vain 20 mm, mikä puolestaan aiheuttaisi hankaluuksia kotelo-rakenteiden kanssa.

Kolmas sylinteri oli sylintereistä kookkain, avonaisella männällä varustettu sylinteri. Mäntä oli sisältä ontto, eikä siinä ollut reiän kohdalla lainkaan kattoa tai pohjaa. Tuotantoon tulevissa osissa oli myös akseleita, joihin tuli asentaa laakereita. Onttomäntäinen sylinteri soveltuisi tällaisiin laakeriasennuksiin erittäin hyvin, sillä akseli voitaisiin pudottaa männän sisään, jolloin kiinnityspisteet saataisiin mahdollisimman lähelle työkohtaa.

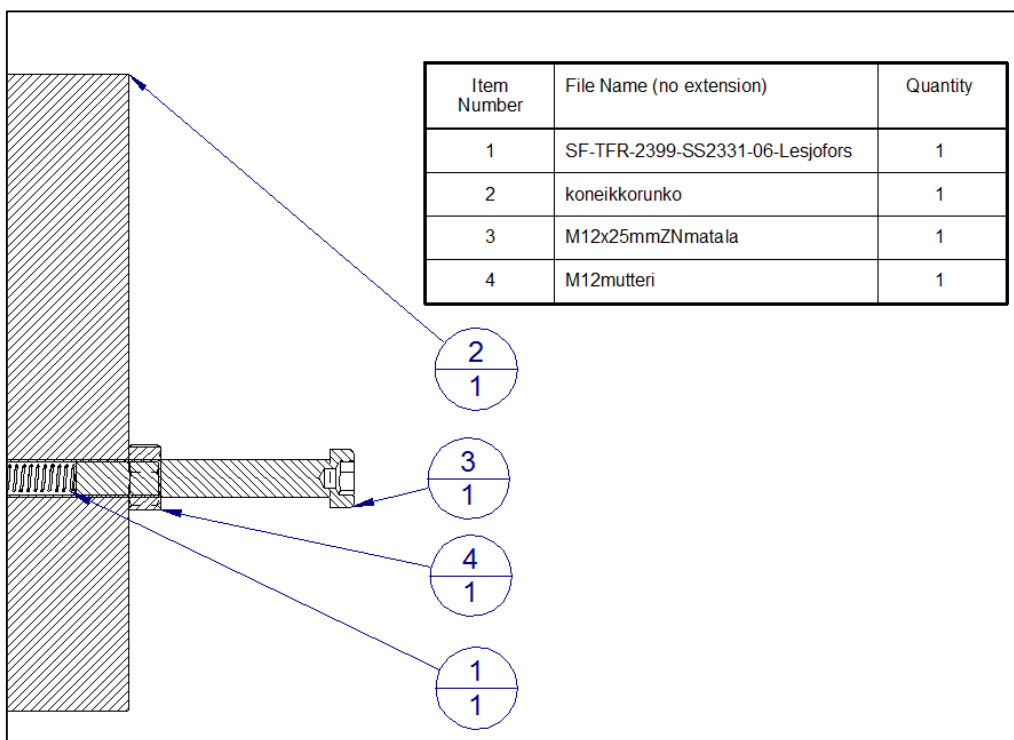
Tämän sylinterin iskunpituus oli 50 mm, mikä riittäisi tämänhetkisten tuotantokappaleiden valmistukseen hyvin, joten päätettiin valita kyseinen sylinteri alustavasti puristimen työsylinteriksi. Sylinterin tyyppikilvestä oli valtaosa tiedoista kulunut pois, mutta siitä voitiin selvästi lukea sylinterin mallinimi, iskunpituus ja suurin tuottovoima tonneina. Sylinterin mallinimi oli RCH-6050, suurin tuottovoima 60 tonnia ja iskunpituus 50 mm.

Sylinterin käyttövoiman tuottamiseen tarvittiin hydraulinen pumppu, joka pystyttäisiin liittämään sylinteriin letkun tai putken avulla. Sylinterin käyttölaitteeksi päätettiin ottaa jo olemassa oleva sähköinen koneikko, joka voitiin liittää sylinteriin hydraulikkaletkun avulla. Koneikosta löytyi valmiiksi hallintalaitteet, joilla voitiin käynnistää ja sammuttaa moottori, säätää vivulla pumpun virtausnopeutta sekä ruuvi, jolla voitiin säätää suurinta maksimipainetta.

Koneikon suurinta tilavuusvirran arvoa ei ilmoitettu, mutta maksimituottopaineeksi ilmoitettiin 100 MPa. Koneikko kytkettiin sylinteriin ja suurimmaksi männän liikenopeudeksi mitattiin 3,75 mm/s. Tämä arvo ei ylitä pakkokäyttöisellä hallintaelimelle varustetulle puristimelle säädettyä suurinta liikenopeutta 10 mm/s (3, s. 56).

### 3.3 Käyttölaitteen muutokset

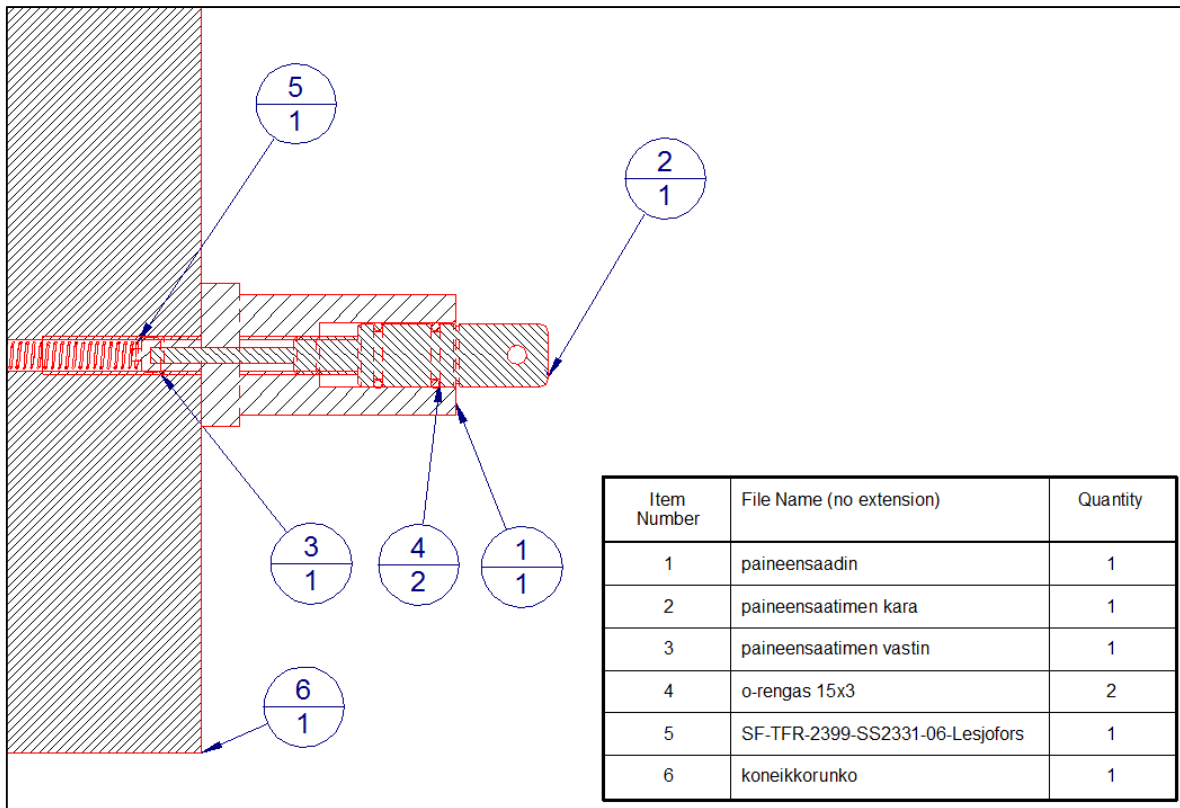
Nykyisessä käyttölaitteessa (kuva 5) havaittiin muutamia vikoja ja puutteita testikäytön aikana. Useiden liitoksien tiivisteet vuotivat, mikä aiheuttaisi käyttäjälle vaaraa, lisäksi laitteen huoltotarvetta sekä aiheutti tarpeetonta työkalupaleiden sotkeutumista työprosessin aikana. Käyttölaitte purettiin osiin ja liitokset tiivistettiin uudelleen.



KUVA 5. Koneikon alkuperäinen paineensäätö

Koneikon tuottaman paineen säätö tapahtui kiristämällä ruuvia (osa 3), jolloin paineenrajoitusventtiilin jousen (osa 1) esijännitys lisääntyi. Lisääntynyt esijännitys puristaa venttiilin karaa tiukemmin kiinni, jolloin lähtöpaineen täytyy kasvaa isommaksi ennen kuin paineenrajoitusventtiili aukeaa. Nykyinen säätömekanismi oli kuitenkin puutteellinen, sillä säätöön tarvitsi aina työkaluja ja jatkuvasti säädettävän liitoksen tiivistäminen oli haasteellista. Säätöruuvien tilalle suunniteltiin säätölaite (kuva 6), jolla säätö onnistui ilman työkaluja ja tiiveys säilyi myös säädön aikana.





*KUVA 6. Koneikkoon suunniteltu paineensäätömekanismi*

Paineensäätimen karaa (osa 2) voidaan kiristää käsin asettamalla vääntövarsi karan päässä olevaan reikään. Tällöin kara kiertyy paineensäätimen runkoon (osa 1) syvemmälle kiristäen paineenrajoitusventtiilin joustaa (osa 5). Karaan sijoitetut O-renkaat (osa 4) liukuvat paineensäätimen rungon sisäpinnalla tiivistäen säätölaitteen. Kappaleiden tarkemmat valmistuspiirustukset esitetään liitteessä 1.

Pumpun virtausnopeuden säätö sellaisenaan toimi tarpeiden mukaisesti. Sen avulla männän nopeutta pystyi säätämään portaattomasti erittäin hitaasta liikkeestä aina maksiminopeuteen saakka. Virtausnopeuden säätövivulla ei kuitenkaan ollut minkäänlaista palautinjoustaa, jolloin käyttölaite jatkaisi syöttöä, vaikka käyttäjä irrottaisi otteensa vivusta. Tämä ominaisuus saattaisi aiheuttaa vaaratilanteita, joten vivulle suunniteltiin palautinjousi.

### 3.4 Koneen riskianalyysi

Koneen yksinkertainen rakenne ja liikkuvien osien vähyys pienentävät merkittävästi koneen käyttöön liittyviä riskejä. Vaatimusten mukaan nämäkin riskit on kuitenkin analysoitava.

Puristimen käyttäjä altistuu käyttötilanteessa seuraaville vaaroille:

- puristumisvaara
- leikkautumisvaara
- viiltovaara
- korkeapaineisen nesteen suihkun tai tunkeutumisen vaara
- sähköstä johtuvat vaarat
- melun aiheuttamat vaarat
- työkalujen tai työkalujen putoaminen tai niiden osien sinkoaminen.

#### 3.4.1 Puristumis-, leikkautumis- tai viiltovaara

Puristimen käyttäjä voi altistua kyseisille vaaroille työkalujen käyttöalueella. Tämä käyttöalue on nimetty puristumisvaaravyöhykkeeksi (4, s. 7). Joissakin puristustöissä puristettavia kappaleita täytyy kannatella puristustyön ajan, jolloin riski käyttäjään kohdistuvasta puristumis-, leikkautumis- tai viiltovaarasta kasvaa.

Puristimen runko tulee mitoittaa siten, että puristimen puristuspisteen ympärillä on riittävästi tilaa, jotta puristimen käyttäjä voi käyttää laitetta turvallisesti. Koska koneenkäyttäjä saattaa joutua kannattelemaan työkappaletta käsillään, täytyy puristuskohdan ympärillä olla vähimmäisetäisyys koneen muihin rakenteisiin 120 mm (4, s. 10).

Puristimien suunnittelussa täytyy huomioida painovoiman johdosta tapahtuva tarkoittamattoman putoamisen estäminen (3, s. 26). Suunnittelussa puristinmallissa sylinteri sijaitsee puristimen alaosassa, jolloin painovoiman johdosta ei voi tapahtua männän tarkoittamatonta putoamista. Ylätyökalun kiinnittyminen ylävastimeen tapahtuu kahden erittäin voimakkaan magneetin avulla, joille määritellään myöhemmin suurin sallittu ylätyökalun paino.

Näiden riskien toteutumisvaara on hyvin vähäinen, mikäli laitetta käytetään käyttöohjeiden mukaisesti ja työvaiheissa käytetään ainoastaan kyseiselle laitteelle suunniteltuja työkaluja. Toteutuessaan riskit voivat kuitenkin aiheuttaa vakavan loukkaantumisen tai jopa kuoleman, joten riskeistä ja toimenpiteistä niiden välttämiseksi on välttämätöntä mainita käyttöohjeissa.

### **3.4.2 Korkeapaineisen nesteen suihkun tai tunkeutumisen vaara**

Letkut, jotka kulkevat käyttäjän työskentelypaikkojen lähellä, täytyy suojata rikkoutuvista letkuista aiheutuvan vaaran välttämiseksi (3, s. 50). Korkeapaineisen nesteen suihku voi tunkeutua ihon läpi ja kulkeutua verenkiertoon aiheuttaen vakavan terveysriskin. Tämän riskin toteutuminen voidaan välttää täysin sijoittamalla letku turvallisesti ja suojaamalla se vaaditulla tavalla.

### **3.4.3 Sähköstä aiheutuvat vaarat**

Koneikon sähkönsyöttöjohdon reititys täytyy valita sellaiseksi, ettei sähköjohto voi puristua koneikon tai puristimen rungon alle aiheuttaen käyttäjälle sähköiskuvaaran. Koneikon sähkönsyöttöjohto on varustettu suojamaadoituksella, jolloin johtimien vaurioitumisen pitäisi laukaista vikavirtasuoja. Tämän riskin toteutumisvaara on hyvin vähäinen, mikäli konetta käytetään ohjeistuksen mukaisesti.

### **3.4.4 Melun aiheuttama vaara**

Puristin tulisi suunnitella siten, että ilman kautta siirtyvän melun aiheuttama riski olisi vähennetty mahdollisimman alhaiselle tasolle (3, s. 50). Sylinterin liike on lähes äänetöntä, mutta koneikko synnyttää melua toimiessaan. Koneelle tulee suorittaa melunmittaus ja melupäästöjen arvot on esitettävä soveltuvin osin standardien EN ISO 3746 ja EN ISO 11202 mukaisesti. Koska koneikkoa ei suunniteltu tämän työn yhteydessä, vaan koneikkona käytettiin valmista kaupallista komponenttia, ei erillistä melunmittausta tehty. Melun aiheuttama vaara on väistämätön riski, mutta sen vaikutus on hyvin pieni johtuen koneikon alhaisesta melutasosta.

### **3.4.5 Työkappaleiden tai työkalujen putoaminen tai niiden osien sinkoaminen**

Käyttäjän huolimattomuudesta tai työkappaleiden vaurioitumisesta johtuvat työkalujen tai työkappaleiden putoamiset voivat käyttäjään osuessaan aiheuttaa vähäisiä tai kohtalaisia vahinkoja. Puristusvaiheessa työkaluista tai työkappaleista sinkoavat osat tai osien kappaleet voivat aiheuttaa käyttäjälle pieniä haavoja tai vammoja käsiin, mutta silmiin osuessaan ne voivat aiheuttaa jopa sokeutumisen. Tämä riskin toteutuminen pitkällä aikavälillä on mahdollista johtuen inhimillisen virheen mahdollisuudesta.

### **3.5 Turvallisuusmääräysten vaikutus**

Konepääötös ja -direktiivit aiheuttivat alkuperäisten rajausten rinnalle lisävaatimuksia. Koska puristimen yksi suunnitelluista käyttökohteista on kylmän metallin muovaus ja männän suurimman liikematkan ollessa 50 mm sekä syötön tapahtuessa käsin, täytyy puristimelle tehdä tyyppitarkastushakemus ennen laitteen käyttöönottoa.

Koneeseen itsessään ei käyttöä häiritsemättä voitu liittää sellaista turvalaitetta, joka estäisi puristimen käytöstä syntyvän puristumisvaaran. Tällaisen turvalaitteen pitäisi estää käyttäjän pääsy puristimen väliin eli työkohtaan, jolloin työkappaleen asetus ja pito olisi mahdotonta. Käyttäjän turvallisuuden takaamiseksi kone täytyy varustaa varoitusmerkein, jossa kerrotaan puristumisvaarasta sekä sinkoavien kappaleiden aiheuttamasta vaarasta. Käyttöohjeissa tulee käydä läpi puristustapahtuman aiheuttamat riskit ja vaarat, kappaleiden sinkoamisen aiheuttavat tilanteet ja niistä aiheutuvat seuraukset sekä hydraulikkajärjestelmän paineesta aiheutuvat riskit ja vaarat.

Koneen käyttäjän tulee käyttää seuraavia henkilökohtaisia suojaimia:

- Putoavilta kappaleilta suojaavat turvakengät.
- Hydraulikkaneesteeltä ja viilloilta suojaavat ohuet käsineet, jotka eivät haittaa koneikon tai työkappaleen käsittelyä.
- Sinkoavilta esineiltä suojaava visiiri tai vähimmäisvaatimuksena suojalasit.

Koneen hydraulikkajärjestelmän letku sijoitettiin kulkemaan puristimen takaa. Lisäksi käyttölaitteeseen lisättiin letkun päälle suoja, jolloin letkun vaurioitumistilanteessa purkautuvan hydraulikkaneesteen aiheuttama riski minimoitui.

## **4 RAKENTEN JA HYDRAULIIKAN DETALJISUUNNITTELU**

Detaljisuunnitteluvaiheessa pyritään luomaan koneesta mahdollisimman yksityiskohtainen malli, johon sisällytetään kaikki lopulliseen kokoonpanoon tulevat komponentit ja ominaisuudet. Rakenteessa voi olla esimerkiksi toistuvia ruuviliitoksia, joiden yksittäinen asettelu on aikaa vievää, eikä sitä ole tarpeen tehdä vielä alustavan suunnittelun yhteydessä. Myös asennustoleranssit ja sovitteet lisätään usein vasta detaljisuunnitteluvaiheessa. Liian yksityiskohtainen alustavan vaiheen suunnittelu aiheuttaa vain turhaa ajanhukkaa, sillä muutoksien tekeminen yksityiskohtaisiin malleihin on huomattavasti työläämpää kuin luonnoksiin.

Detaljisuunnitteluvaiheessa pyritään varmistamaan, että kaikki kokoonpanon komponentit ovat asennettavissa ja osien valmistus on valmistusteknisesti mahdollista. Lisäksi tarkistetaan, että mitoitettut asennusvälykset tai -sovitteet ovat halutun mukaisia ja koneen mahdolliset liikkuvat osat eivät törmää liitoselimiin tai muihin rakenteisiin.

### **4.1 Rakennesuunnittelu**

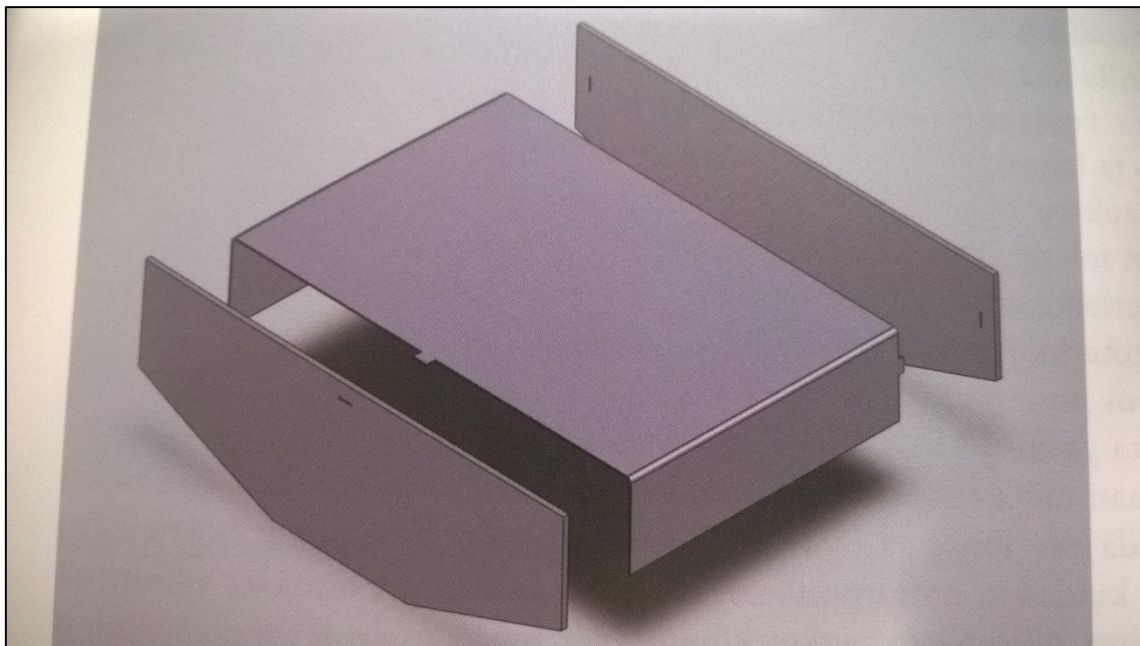
Rakenne pyrittiin suunnittelemaan sellaiseksi, että se koostuisi ainoastaan suorista levyosista, jotka eivät vaatisi koneistusta tai muuta jälkikäsittelyä. Tällöin komponenttien hinnat säilyisivät mahdollisimman edullisina. Koska rakenteen ei tarvitse olla purettavissa, valittiin komponenttien liitosmenetelmäksi hitsaus ruuviliitosten sijaan.

#### **4.1.1 Laserleikkaus valmistusmenetelmänä**

Komponenttien valmistusmenetelmäksi valittiin laserleikkaus, jolla saadaan leikkattua riittävän mittatarkat kappaleet suorasta levyaihiosta. Alle 10 mm paksuisia materiaaleja laserilla leikattaessa mittatarkkuus on pääsääntöisesti noin 0,1 mm riippuen leikkausprosessista. Tarkkuus sellaisenaan ei riitä sovitetarkkuudeksi, mutta normaalien levyosien liitostarkkuudeksi se riittää hyvin. Laserleikkauksessa railon leveys määräytyy leikattavan materiaalin vaatimusten mu-

kaan. Paksummille materiaaleille railon täytyy olla leveämpi kuin ohuille materiaaleille, jotta sula aines saadaan poistumaan leikkauskohdasta. Railon leveys vaihtelee tyypillisesti välillä 0,05 - 1,0 mm, minkä vuoksi rakenteen suunnittelussa täytyy huomioida kulmiin syntyvä leikkausrailon säteen suuruinen pyöritys. Laserleikkaamalla levyyn voidaan tehdä monimutkaisiakin muotoja tai reikiä ja nykyaikaisilla koneilla voidaan tehdä jopa 3D-leikkauksia. Oikein säädetyllä laserleikkurilla pursetta ei synny leikkauksen yhteydessä käytännössä lainkaan, minkä vuoksi leikattujen osien jälkikäsittelylle ei ole tarvetta. (5, s. 162 - 164.)

Laserleikkauksen tarjoamia mahdollisuuksia päätettiin hyödyntää rakennesuunnittelussa siten, että kappaleet liittyisivät toisiinsa sopivilla koloilla ja ulokkeilla (kuva 7). Kolojen ja ulokkeiden avulla kappaleet paikoittuisivat toisiinsa nähden oikein, mikä helpottaisi kokoonpanoa merkittävästi ja lisäisi lopputuotteen mittatarkkuutta.

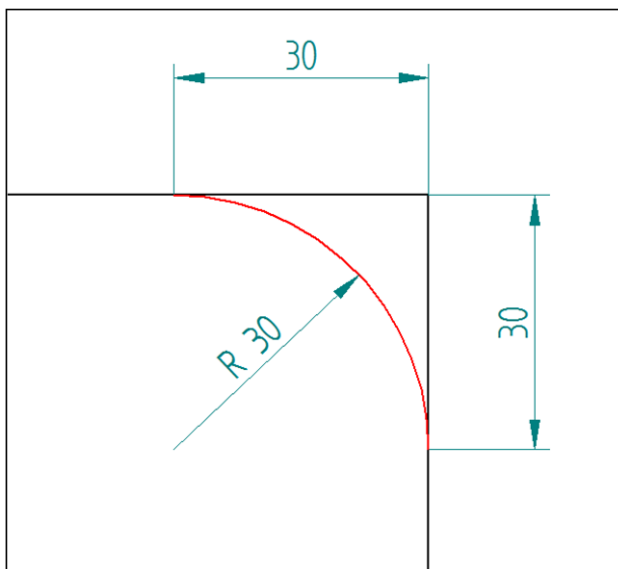


*KUVA 7. Esimerkki paikoitusulokkeiden käytöstä (5, s. 164)*

Ohutlevyillä tyypillinen nastan ja kolon sovitevälys voi olla noin 0,2 mm (5, s. 164). Sovitevälys helpottaa merkittävästi laitteen kokoonpanoa, mutta tarpeeton välys lisää lopputuotteen mittaepätarkkuutta. Laserleikkauksella saadaan hyödynnettyä viimeistelty ulkonäkö ja työstönopeus pyöristämällä nurkkien kulmat. Laserleikkauksen leikkausnopeus on suoraan suhteessa kuljettuun matkaan, ja

lisäksi terävässä nurkassa kone joutuu hetkellisesti pysähtymään suuntaa muuttaessaan.

Kuvassa 8 esitetään nurkkaleikkauksen vaihtoehtoiset menetelmät. Esimerkitapauksessa suorakulman leikkauksessa kulman kokonaisleikkausmatkaksi muodostuu 60 mm. Vastaavasti jos sama kulma leikataan 30 mm kaarevuussäteellä, muodostuu kokonaismatkaksi noin 47 mm. Leikatessa kulma pyöreäksi kokonaismatka on siis noin 22 % vähemmän kuin vastaavan kulman leikkaus suorakulmaiseksi. Laserleikkauksen kustannus on taas suoraan riippuvainen valmistusaikaan, minkä vuoksi kulmien pyöristäminen lisää kustannustehokkuutta.



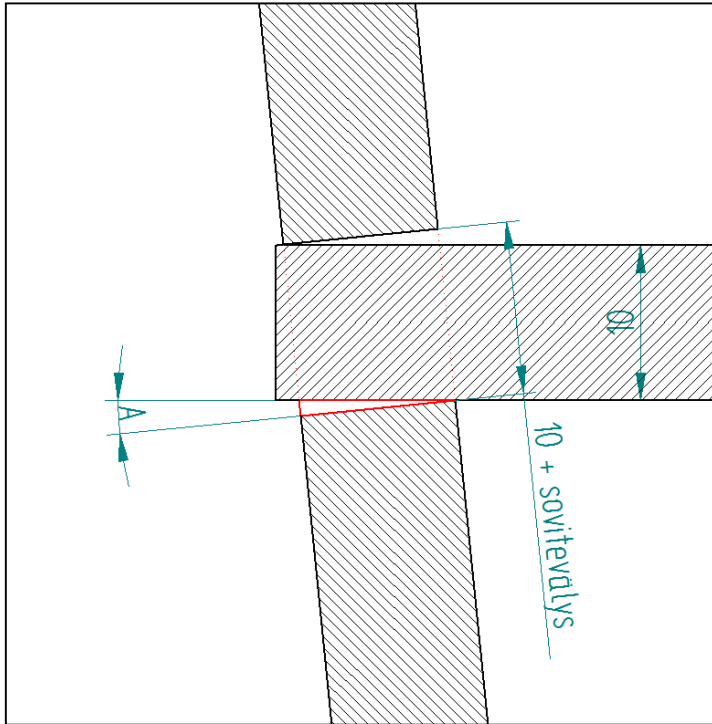
*KUVA 8. Kappaleen kulman leikkausmenetelmät, suositeltu leikkauslinja kuvattu punaisella värillä*

#### **4.1.2 Sovitevälyksen aiheuttama mittaepätarkkuus**

Soviteväly on välttämätön asennuksen mahdollistamisen kannalta, mutta samalla soviteväly sallii kappaleiden kallistumisen toisiinsa nähden. Sovitevälyksen ja työkalujen keskipisteiden keskisyyteen aiheutuvan virheen yhteys pyrittiin selvittämään käyttäen perinteisiä trigonometrisiä funktioita ja pythagoraan lausetta.



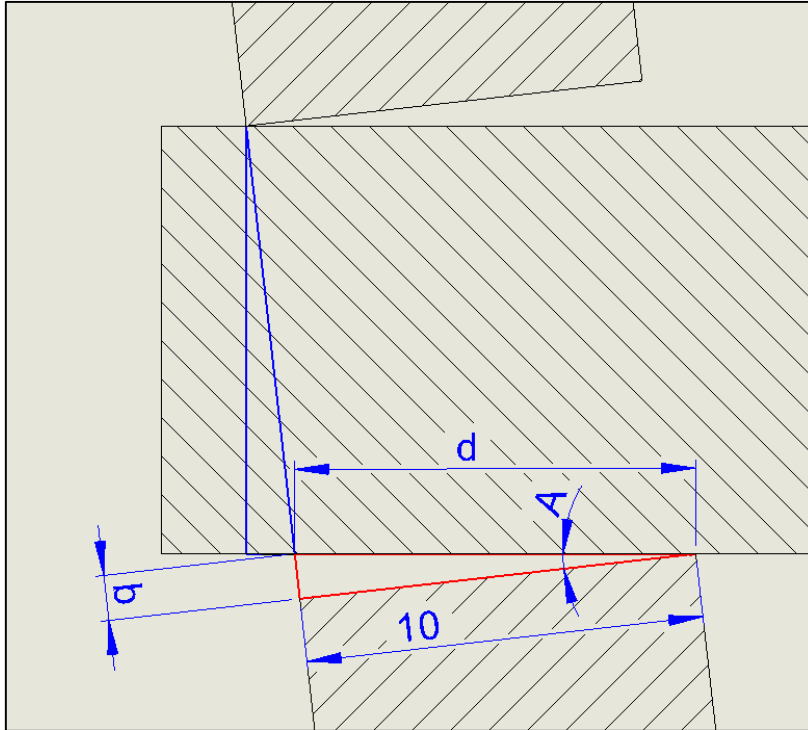
Kuvassa 9 esitetään liioitellusti välyksen sallima kallistuskulma liitoskohdissa. Vaakapalkin alapuolelle piirretyn punaisen suorakulmaisen kolmion avulla tutkittiin sovitevälyksen ja syntyvän kulman A riippuvuutta. Kolmion pitkä kateetti on sama kuin materiaalin ainevahvuus, joka oli tässä tapauksessa 10 mm. Kolmion lyhempi kateetti on pienillä kallistuskulmilla likimain liitokseen mitoitettun sovitevälyksen pituinen.



*KUVA 9. Välyksen sallima kallistuma "A" kappaleiden liitoskohdissa*

Tutkitussa tilanteessa kallistuskulman kasvaessa lyhempi kateetti pieneni, koska kallistuman kasvu lisäsi vaakapalkkiin hahmotellun pystypalkin suuntai-

sen poikkileikkausviivan pituutta. Havaittiin, että kuvaan voitiin hahmotella kuvassa 10 esitettävä sinisellä värillä kuvattu toinen suorakulmainen kolmio, joka oli edellisen suorakulmion peilikuva.



KUVA 10. Liitokseen hahmotellut suorakulmaiset kolmiot

Kolmioiden hypotenuusat nimettiin  $d$ :ksi ja lyhyemmät kateetit  $b$ :ksi. Laskemalla punaisen kolmion sivu  $b$  ja sinisen kolmion kateetti  $d$  yhteen saatiin liitokseen mitoitettun raon kokonaismitta. Näiden avulla voitiin luoda kaksi yhtälöä, joiden avulla voitiin selvittää kallistettuun liitokseen jäävä rako  $b$ . Tämän selvittämiseksi luotiin kaava 1 pythagoraan lauseen mukaisesti (6, s. 17).

$$d^2 = b^2 + (10 \text{ mm})^2 \quad \text{KAAVA 1}$$

Toinen ratkaisuun vaadittava yhtälö muodostettiin kateetin ja hypotenuusan summasta. Laskettiin suurin mahdollinen kallistuma, kun liitosten välykseksi mitoitettiin luvussa 4.1.1 Laserleikkaus valmistusmenetelmänä esitellyn ohjearvon mukainen 0,2 mm. Edellisessä kappaleessa esiteltyjä muuttujia käyttäen voidaan muodostaa kaava 2 kolmioiden suhteiden avulla.

$$b + d = 10 \text{ mm} + 0,2 \text{ mm} \quad \text{KAAVA 2}$$

Kaavasta 2 ratkaistiin b:n riippuvuus muihin tekijöihin.

$$b = 10,2 \text{ mm} - d$$

KAAVA 3

Seuraavaksi sijoitettiin b kaavaan 1.

$$d^2 = (10,2 \text{ mm} - d)^2 + (10 \text{ mm})^2$$

$$d = 10,00196 \dots \text{ mm}$$

Kun d tiedettiin, saatiin kaavan 3 avulla ratkaistua b.

$$b = 10 \text{ mm} + 0,2 \text{ mm} - d = 10 \text{ mm} + 0,2 \text{ mm} - 10,00196 \text{ mm}$$

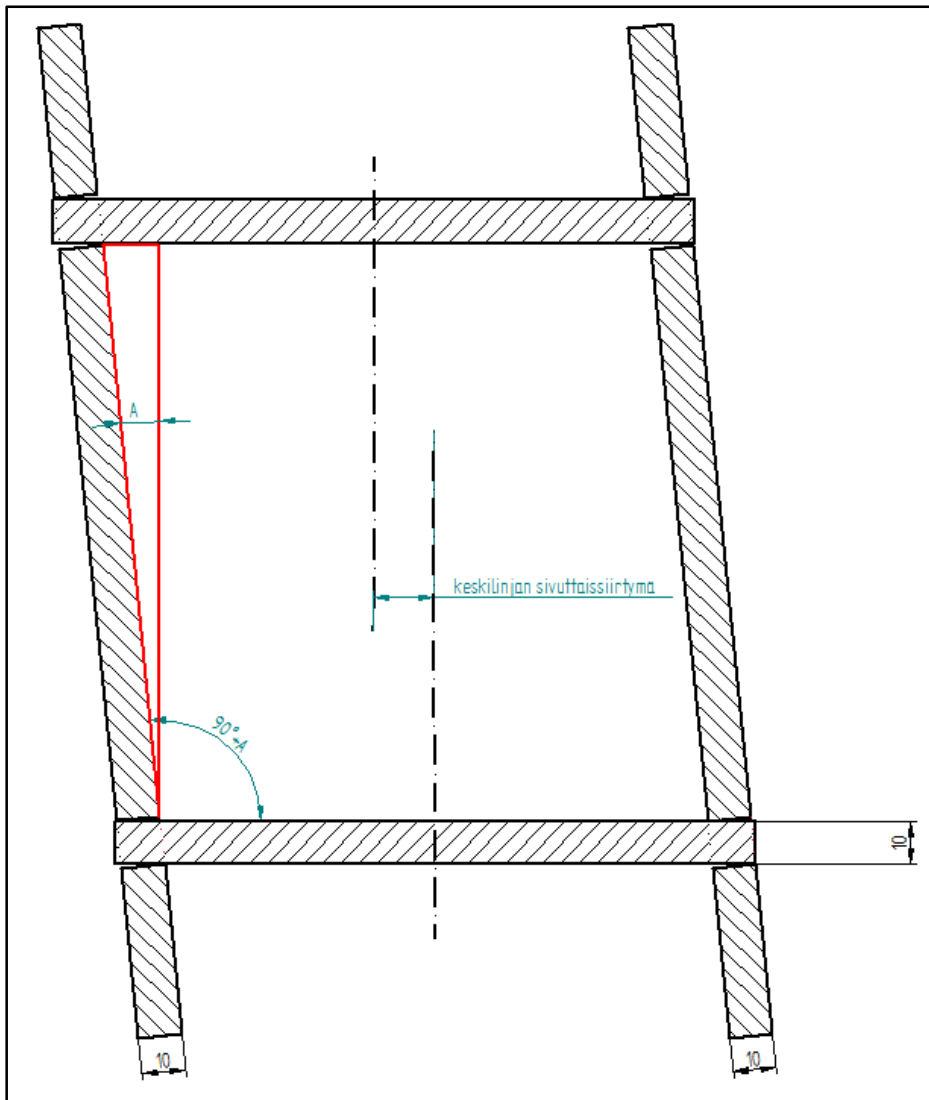
$$b = 0,198 \text{ mm}$$

Kateetin sivun ollessa todellisuudessa 0,198 mm 0,2 mm kokonaisvälyksellä maksimikallistustilanteessa oli poikkeama oletettuun 0,2 mm arvoon vain hieman alle prosentin suuruinen. Liitoksessa välyksestä aiheutuva suurin mahdollinen kallistuma A laskettiin kuvassa 10 esitetyn punaisen suorakulmaisen kolmion avulla käyttäen kateetteina lukuarvoja 0,198 mm ja 10 mm.

$$\tan A = \frac{0,198 \text{ mm}}{10 \text{ mm}}$$

$$A = 1,134^\circ$$

Kuvassa 11 esitetään sovitevälyksen aiheuttama virhe koko rakenteeseen, mikäli rakenteen tukemiseen osallistuisivat vain ylä- ja alapalkkien tapaiset vaakatasot. Tästä virheestä voisi aiheutua haitallinen keskilinjän sivuttaissiirtymä. Rakenteen symmetrisyyden avulla vältetään kuitenkin keskilinjien kallistuksien poikkeamien syntyminen.



*KUVA 11. Välyksien sallima keskilinjan sivuttaissiirtymä yksinkertaisessa rakenteessa; poikkileikkaus kuvattuna rakenteen sivulta katsottuna, jolloin siirtymä koneen käyttäjään nähden kuvaa keskilinjojen poikkeamaa syvyys suunnassa*

Kuvan 11 esittämässä tilanteessa välyksen aiheuttama virhe voidaan selvittää rakenteeseen piirretyn punaisen suorakulmaisen kolmion avulla. Kun kolmion yksi kulma sekä hypotenuusa tiedetään, voidaan ratkaista kolmion lyhyt kateetti, joka tässä tapauksessa on sama kuin rakenteeseen syntyvä vaakapalkkien keskilinjojen sivuttaissiirtymä. Muodostettiin yhtälö, joka kuvaa keskilinjojen ja sivuttaissiirtymän suhdetta. Rungon mitoituksen perusteella hypotenuusa oli 580 mm. Kuvataan keskilinjojen sivuttaissiirtymää kirjaimella S ja sijoitetaan kulman A tilalle ratkaistu suurin kallistuman arvo 0,2 mm kokonaisvälyksellä.

$$\sin A = \frac{S}{580 \text{ mm}}$$

$$\sin 1,134^\circ = \frac{S}{580 \text{ mm}}$$

Vaikka rakenteessa todellisuudessa on kaksi vaakapalkkia päällekkäin sekä ylhäällä että alhaalla, tilanne säilyy teoriatasolla silti samana sillä olettamuksella, että välykset ovat samat joka liitoksessa. Rakenne hitsataan kasaan, mikä lukitsee komponentit tiettyihin asentoihin, jolloin välyksien aiheuttama kulma ei pääse hitsauksen jälkeen enää muuttumaan. Suurin mahdollinen sivuttaissiirtymä täytyy kuitenkin määrittellä laitteen tarkkuuden määrittelemiseksi, sillä suuret välykset mahdollistaisivat laitteen virheellisen kokoonpanon.

$$S = 580 \text{ mm} * \sin(1,134^\circ) = 11,48 \text{ mm}$$

Mikäli ylä- ja alatasojen keskilinjojen poikkeama valmiissa kokoonpanossa olisi 11,48 mm, voidaan tutkimattakin sanoa varmaksi, että valtaosa kokoonpantavista tuotteista vaurioituisi tai työn suoritus epäonnistuisi. Asennuksen mahdollistamiseksi ohjearvon mukainen välys on laitettava liitoksiin, sillä liian pieneen rakoon ulokkeen asentaminen on mahdotonta käytettävissä olevilla välineillä, kun kyseessä on näin suuret kappaleet.

Todettiin, että rakenteeseen täytyi lisätä komponentteja, jotka osallistuisivat pääkomponenttien paikoittamiseen. Päätettiin lisätä rakenteeseen perusrakenteen lisäksi kylkipalkit, jotka paikoittuisivat perusrakenteeseen muotoulokkeiden avulla. Tällöin jokainen uloke ja sivupalkin kylki estävät rakenteen vinoutumisen parantaen merkittävästi laitteen tarkkuutta.

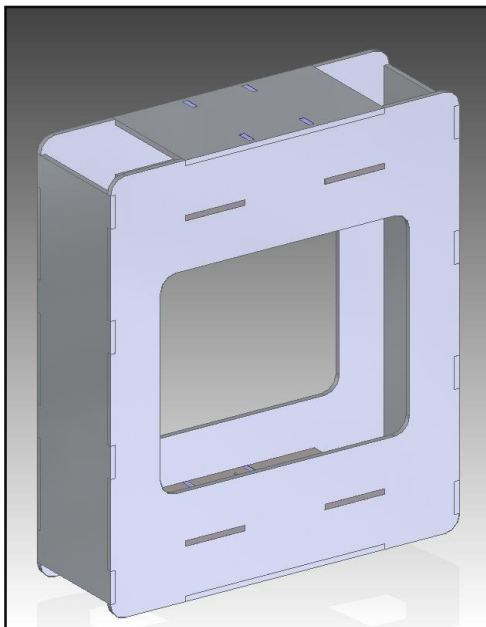
#### **4.1.3 Rakenteen 3D-mallin luonti**

Puristimen rungon 3D-mallinnus aloitettiin käyttäen Solid Edge -ohjelmistoa pitäen mielessä laserleikkauksen tuomat edut. Jokainen komponentti mallinnettiin yksittäiseksi levyosaksi, jotka koottiin myöhemmin yhdeksi kokoonpanoksi.

Suunnittelussa pyrittiin luomaan mahdollisimman paljon keskenään symmetrisiä osia valmistuksen helpottamiseksi. Komponenttien sijoittelu oli merkittävä

seikka rakenteen jäykkyyden kannalta. Komponenttien sijoittelua ja lovien paikkoja kokeiltiin useisiin kohtiin, kunnes saavutettiin ratkaisu, joka vaikutti toimivalta.

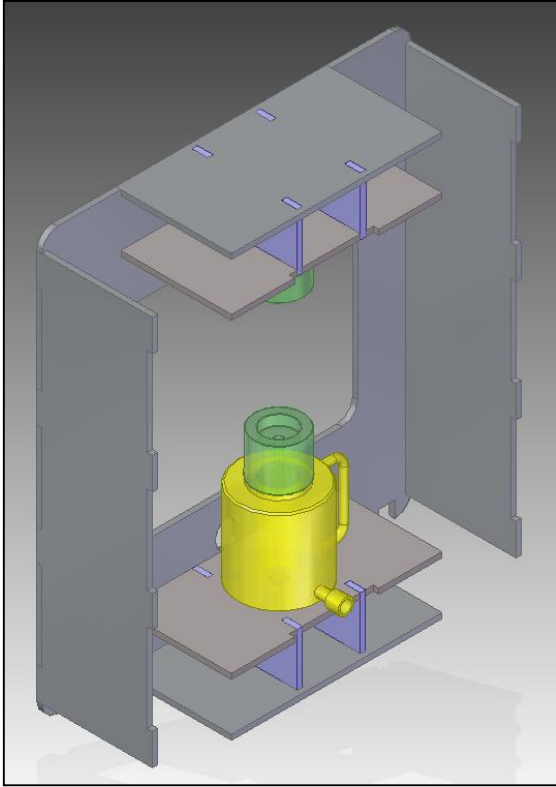
Kuvassa 12 esitetään ensimmäinen toimivaksi arvioitu versio rungon kokoonpanosta, joka sisältää rungon peruskomponentit muotoulukkeineen. Muotoulukkeiden välyksiä ei vielä tässä vaiheessa lisätty, vaan ulokkeet suunniteltiin toisiinsa sopivaksi nimellismittoja käyttäen. Yksittäisille osille suoritettiin karkeita lujuusanalyyskejä käyttäen ohjelman elementtimenetelmiin perustuvia simulointimenetelmiä. Lujuustarkastelu suoritetaan tarkemmin myöhemmin luvussa 5 Rakenteen lujuustarkastelu.



*KUVA 12. Keskeneneräinen rungon kokoonpanoa kuvaava 3D-malli, josta käy ilmi rungon peruskomponentit ja niiden sijoittelut*

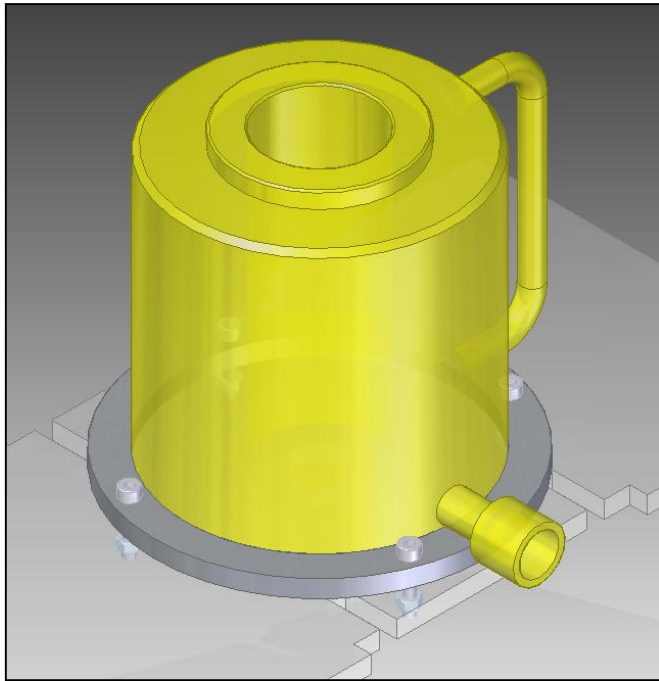
Kuvassa 13 esitetään sylinterin (keltainen väri) sekä ylä- ja alatyökalunpitimien (vihreä väri, osittain läpinäkyvä) sijoittelu runkoon. Ylä- ja alavaakapalkkien (ruskeanharmaa) pystytuet (violetti) sijoitettiin hieman erilleen toisistaan, jotta mahdolliset muodonmuutokset rakenteen kuormitustilanteessa aiheuttaisivat mahdollisimman symmetrisen poikkeaman rakenteisiin. Koska sylinterin mäntä on ontto, alapuolella tukien sijoitteluleveys valittiin sellaiseksi, että niiden keski-kohta osui sylinterin pohjaympyrän tukipinnan keskelle. Yläpuolella pitäydyttiin

samassa rakenteessa symmetristen ulkomuotojen säilyttämiseksi. Ylälautasen tuenta olisi voitu laittaa täysin työkalunpitimen keskelle, mutta tällöin pienikin virhe työkalun tai työkappaleen keskityksessä aiheuttaisi välittömästi ei-toivotun epäsymmetrisen muodonmuutoksen runkoon.



*KUVA 13. Sylinterin ja työkalunpitimien sijoittuminen runkoon, mallista on piilotettu toinen pystykehikoista*

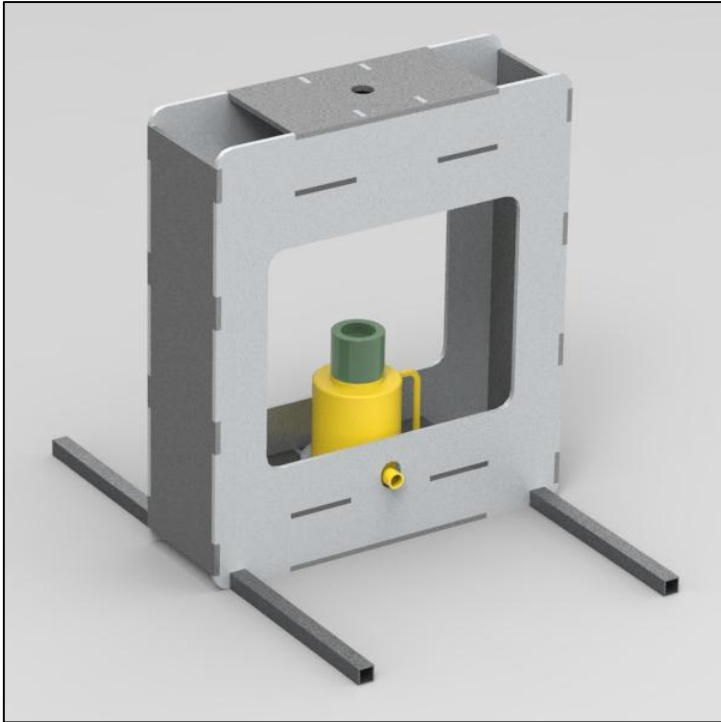
Kuvassa 14 esitettävä sylinterin paikoitus toteutettiin suunnittelemalla laserleikattu panta, joka ruuvattaisiin neljällä ruuvi-mutteriliitoksella alalevyyn kiinni. Pannan tarkoituksena ei ollut varsinaisesti estää sylinterin pystysuuntaista liikettä vaan ainoastaan estää sen liike vaakatasossa.



*KUVA 14. Sylinterin paikoittuminen alatasoon*

Alas sijoittuva työkalunpidin suunniteltiin sellaiseksi, että se lepää sylinterin männän päällä. Yläpuolinen työkalunpidin kiinnitettiin ruuviliitoksella suunnittele-malla kierre ylätyökaluun ja reikä ylätasanteeseen. Rakenteen vakauttamiseksi etu- ja takaseiniin tehtiin alareunaan lovet, johon suunniteltiin neliöputkesta pöy-tää vasten tulevat jalakset. Kuvassa 15 esitetään koneen lopullinen versio. Eri komponenttien värejä on korostettu liitosten havainnollisuuden parantamiseksi.

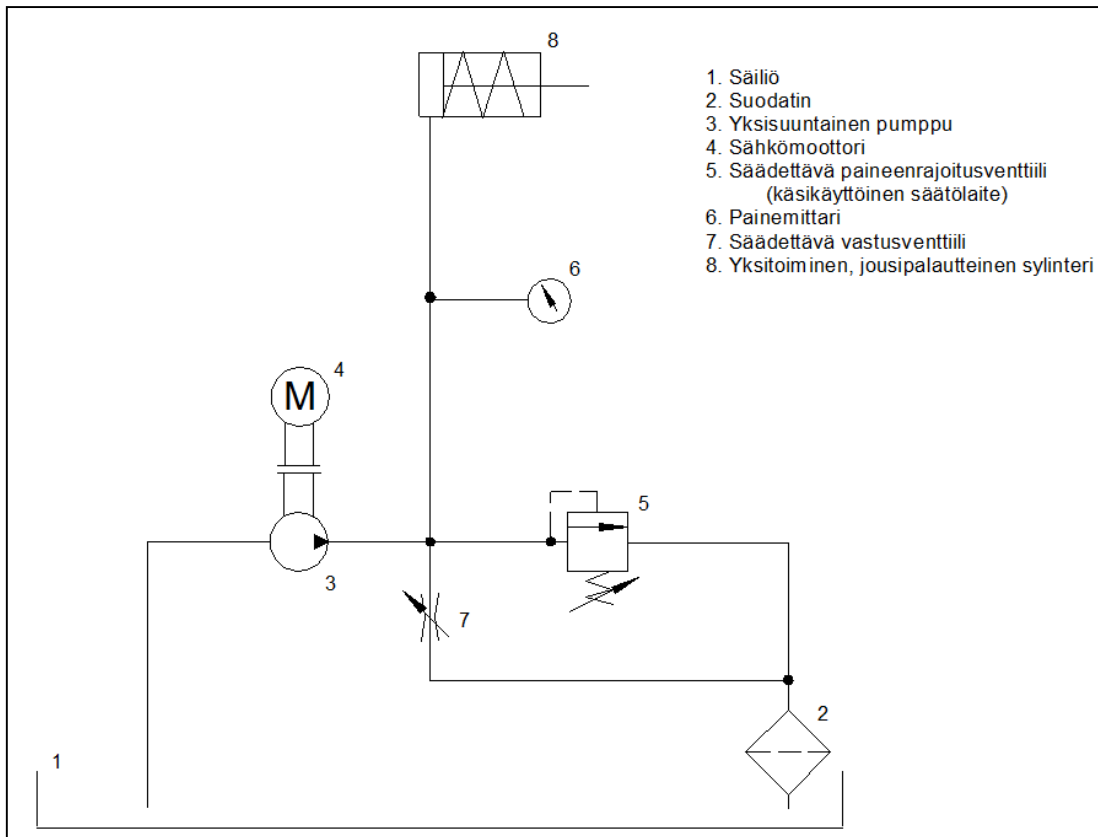




*KUVA 15. Solid Edgen KeyShot 5.0 -laajennuksella luotu renderöity kuva valmiista kokoonpanosta*

## **4.2 Hydraulikkajärjestelmä**

Hydraulikkajärjestelmän komponentit ja piirikaavio selvitettiin samalla, kun laitteeseen vaihdettiin valtaosa tiivisteistä. Järjestelmälle laadittiin kuvassa 16 esitetty sitä vastaava piirikaavio käyttäen Solid Edge 2D Drafting -ohjelmistoa.



KUVA 16. Hydraulikkajärjestelmän piirikaavio ja komponentit

Kun sähkömoottori (osa 4) kytketään virtapainikkeestaan päälle, alkaa se pyörittää yksisuuntaista hydraulikkapumppua (osa 3). Hydraulikkapumppu syöttää nesteen kolmelle toimilaitteelle. Lepotilanteessa vastusventtiili (osa 7) on täysin auki, jolloin kaikki neste virtaa venttiiliin kautta suodattimelle (osa 2). Suodatin sijoitetaan yleensä paluupuolelle, sillä imupuolelle sijoitetun suodattimen tukkeutuminen aiheuttaisi vakavan kavitaatiovaaran järjestelmään (7, s. 476).

Hydraulikkanesteen ollessa kosketuksissa ilman kanssa siihen liukenee aina jonkin verran ilmaa, ja jos nesteen paine pienenee siitä arvosta, jossa liukeminen on tapahtunut, erkanee ilma nesteestä muodostaen kuplia nesteeseen. Sen seurauksena neste on nyt ilman ja hydraulikkanesteen seos ja ilman suuremman kokoonpuristuvuuden vuoksi myös koko nesteen kokoonpuristuvuus kasvaa. Jos nesteen paine alkaa nopeasti nousemaan, ei kupliksi muodostunut ilma ehdikään liueta takaisin aineeseen, vaan se puristuu lähes adiabaattisesti kokoon, jolloin sen lämpötila voi kasvaa merkittävästi. Lämpötila voi nousta niin suureksi, että se vahingoittaa öljyn ominaisuuksia ja lyhentää elinikää. Lisäksi

äkillisesti purkautuvat kuplat voivat aiheuttaa mekaanisia vaurioita järjestelmän komponentteihin. (7, s. 476.)

Kun vastusventtiiliä kierretään tiukemmalle, alkaa paine pumpun ja venttiilin välillä nousemaan, sillä kaikki pumpun tuottama neste ei ehdi poistua vastusventtiilin välistä. Tämä paine alkaa vaikuttaa yksitoimisen jousipalautteisen sylinterin (osa 8) mäntään, jolloin sylinteri alkaa suorittaa ulos-liikettä. Järjestelmän paine pysyy kuitenkin lähellä nollaa, kunnes sylinteri saavuttaa mekaanisen esteen, tässä tapauksessa esimerkiksi puristettavan työkappaleen.

Liikkeellelähtötilanteessa järjestelmän paineen synnyttämän voiman sylinterissä on ainoastaan voitettava männän painosta aiheutuva voima sekä männän palautuksesta huolehtivan apujousen tuottama voima. Männän saavuttaessa mekaanisen esteen järjestelmän paine lähtee nousemaan, ja tämä paineen nousu voidaan havaita painemittarista (osa 6).

Sylinterin tuottama maksimivoima voidaan määrittää järjestelmään asennetun säädettävän paineenrajoitusventtiilin (osa 5) avulla. Sylinterin tuottama voima on suoraan suhteessa järjestelmän paineeseen. Kun järjestelmän paine saavuttaa sille säädettävällä paineenrajoitusventtiilillä asetetun rajan, avautuu paineenrajoitusventtiili päästäten ylimääräisen paineen suodattimen kautta takaisin säiliöön. Paineenrajoitusventtiilillä voidaan säätää järjestelmän paine nolasta pumpun tuottamaan maksimipaineeseen asti. Kun sylinterillä halutaan suorittaa paluuliike, avataan vastusventtiili, jolloin järjestelmän paine purkautuu venttiilin ja suodattimen kautta säiliöön.

Käyttölaitteiden lisäksi hydraulikkajärjestelmässä on oltava paineenrajoitusventtiili, jonka säätöä ei voi muuttaa ilman työkaluja. Tämä paineenrajoitusventtiili on säädettävä siten, että sen painearvo ylittää enintään 10 % suurimman sallitun käyttöpaineen (3, s. 30). Tämä huomioitiin järjestelmässä mitoittamalla paineen-säätölaitteen kara riittävän lyhyeksi, jolloin sitä kiristämällä ei voitu ylittää järjestelmälle asetettua maksimipainetta.

Sylinterin tuottamaa voimaa ei voida sellaisenaan järkevästi mitata, vaan voima selvitetään sylinterille tuodun paineen avulla. Valitusta sylinteristä ei kuitenkaan tiedetty pinta-alaa, minkä vuoksi sylinterin tuottamaa voimaa ei voitu suoraan

määrittää järjestelmän painemittarin avulla. Sylinterille ilmoitettu nimellismaksimityöntövoima oli ilmoitettu olevan 60 tonnia. Sylinterin pääsääntöinen käyttöalue kuitenkin tulee olemaan välillä 1 - 30 tonnia, joten sylinterin käyttöpaineen ja työntövoiman suhde tuli selvittää. Sylinterin pinta-alan määrittäminen sylinteriä purkamatta oli haasteellista sylinterin ontton männän aiheuttaman rakenteen takia.

Sylinterin pinta-ala selvitettiin siten, että sylinterin perään laitettiin kuvassa 17 esitetyllä tavalla toinen pienempi sylinteri, jonka toiminta tunnettiin. Molemmat sylinterit kiinnitettiin tukevasti kahden palkin väliin. Tähän sylinteriin liitettiin painemittari, jonka avulla voitiin mitata pienemmän sylinterin painetta. Isommalla sylinterillä puristettiin hieman pientä sylinteriä, jolloin saatiin luettua molempien sylinterien paineet omista mittareistaan. Pientä sylinteriä kokoon painava voima voitiin lukea sille laaditusta asteikosta.

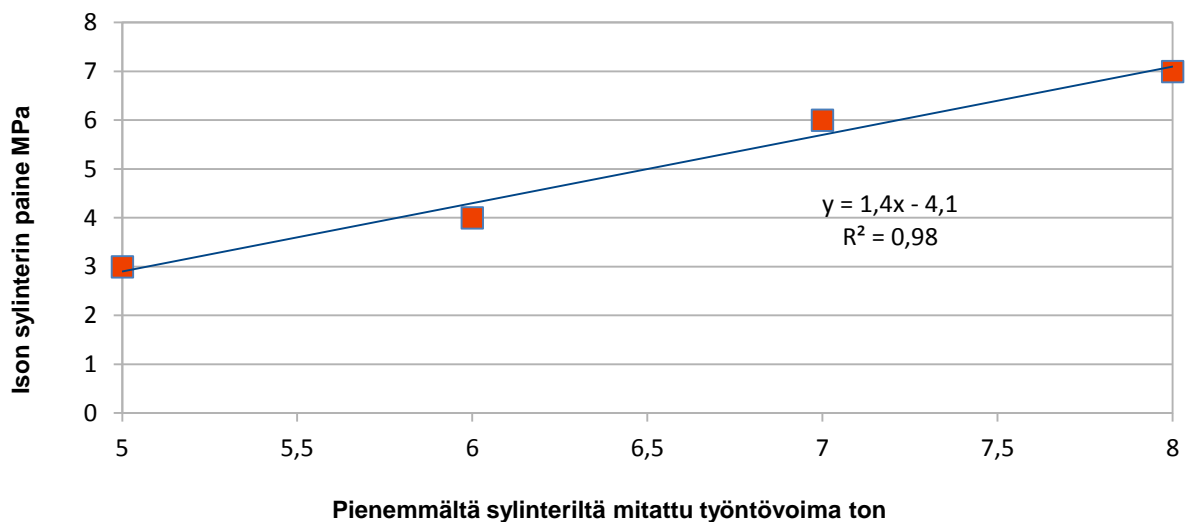


*KUVA 17. Sylinterin työntövoiman mittausjärjestely*

Molempia sylintereitä kokoon painavan voiman tuli olla sama Newtonin III:n lain nojalla. Pienemmän sylinterin suurin sallittu työntövoima oli 10 tonnia, joten mit-

taus suoritettiin tonnin välein välillä 5 - 8 tonnia. Havaittiin, että mittauksen toistaminen samassa pisteessä oli tarpeetonta, sillä mittareiden tarkkuuden puitteissa eroja saman mittauksen toistossa ei voitu havaita. Suorittamalla mittaus tiedettiin isomman sylinterin paine ja sitä painava voima, minkä jälkeen kaavaa 1 soveltamalla voitiin määrittää isomman sylinterin pinta-ala.

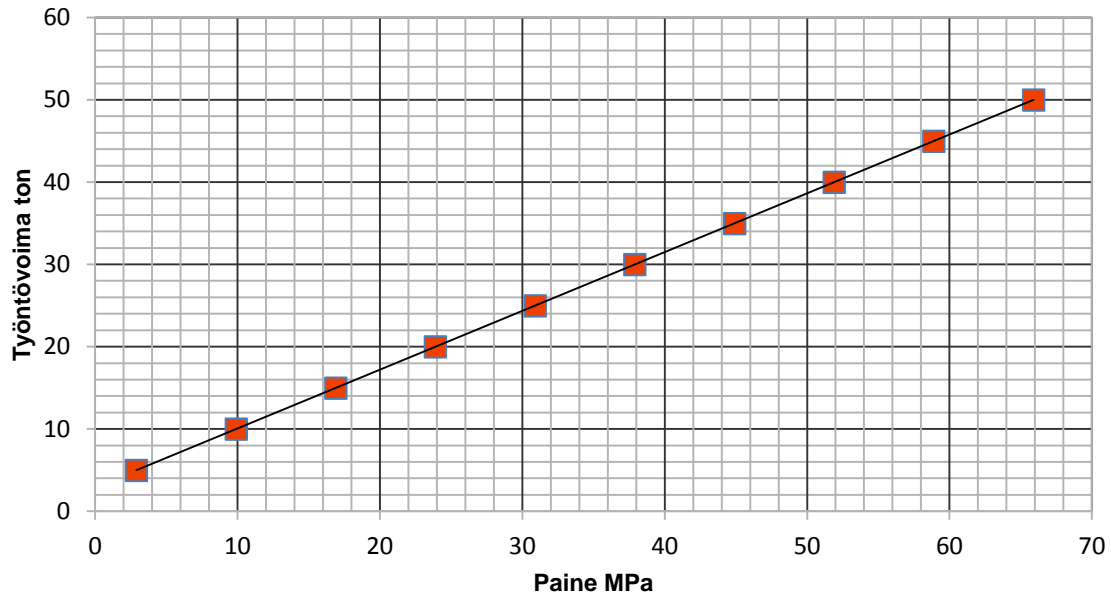
Mittaustuloksista laadittiin kuvaaja (kuva 18), johon asetettiin näkyville trendiviiva ja mittapisteiden osumista trendiviivalle kuvaava determinantti  $R^2$ . Kuvaajasta voidaan havaita, että mittapisteet osuvat lineaariselle trendiviivalle kohtalaisen hyvin. Pisteiden tulisi teoriassa muodostaa täysin lineaarinen suora, mutta mittausjärjestelyn epätarkkuudet aiheuttivat mittavirhettä tuloksiin. Tuloksien avulla voidaan kuitenkin estimoida sylinteripaineen ja työntövoiman riippuvuuskuvaaja.



KUVA 18. Sylinterin työntövoiman suhde käyttöpaineeseen

Työntövoimalle määriteltiin painearvot funktion  $f(x) = 1,4x - 4,1$  avulla 50 tonniin asti. Työntövoimaa kuvaavassa kaaviossa (kuva 19) akselit käännettiin tulkinnan helpottamiseksi toisin päin. Tämän taulukon perusteella voidaan asettaa hydraulikkajärjestelmän paineenrajoitusventtiili jokaisen eri työvaiheen vaatimalle tasolle, kun työvaiheen vaatima työntövoima tiedetään. Esiasetuksen ansiosta painetta ei tarvitse säätää työvaiheen toistojen aikana. Tällöin järjestel-

män käyttäjän täytyy vain suorittaa työkalujen ja -kappaleen asetus, minkä jälkeen puristustyö voidaan tehdä koneikkoa käyttäen ilman kappaleen vahingoitusriskiä.



KUVA 19. Työntövoiman suuruus käyttöpaineen funktiona

### 4.3 Työkalut

Erilaisia työkaluja oli nykyiselläänkin noin 20, ja työkaluja tultaisiin tuotannon laajentuessa tarvitsemaan vielä nykyistä määrää enemmän. Myös suurempia puristusvoimia kestäviä työkaluja tultaisiin mahdollisesti tarvitsemaan. Kaikki työkalut on valmistettu teräksestä ja niille on suoritettu pintakarkaisu työstön jälkeen. Jokaiselle työvaiheelle on aina omanlaisensa työkalu, ja lähes poikkeuksetta yksi työvaihe vaatii yksilöllisen ylä- ja alatyökalun. Useimmiten toisen työkalun tehtävänä on tukea oikeasta kohdasta kappaletta, johon puristuksesta aiheutuvat tukivoimat kohdistuvat ja toisen työkalun tehtävänä on suorittaa puristustyö.

Yhtä työvaihetta tullaan toistamaan sarjatyömäisesti, mutta sarjat ovat suurimmillaan muutaman kymmenen kappaleen sarjoja. Sarjakoot on suhteutettu valmiiden tuotteiden kokoonpanoon tarvittavaan määrään, jotta alikokoonpanoja ei varastotilan säästämiseksi tehtäisi liian suuria määriä. Pienien sarjojen vuoksi

yhden päivän aikana työkaluja joudutaan vaihtamaan useita kertoja, minkä takia työkalun vaihtaminen täytyi suunnitella helpoksi ja nopeaksi toimenpiteeksi.

Työkalujen kiinnitykseen päätettiin tehdä kaksi standardikokoa, joista toinen olisi pienehköjä voimia vaativien puristustöiden työkalujen kiinnitystä varten ja toinen suurempia voimia vaativia puristustöitä varten. Pienissä puristustöissä työkalujen suuri fyysinen koko haittaisi tarpeettomasti näkyvyyttä työkohteeseen ja lisäisi merkittävästi työkalujen valmistuskustannuksia.

Suuremmissa puristustöissä liian pieni fyysinen koko voisi aiheuttaa pitkällä aikavälillä muodonmuutoksia työkaluissa, mikä johtaisi hiljalleen systemaattiseen virheeseen valmistusprosessissa. Tällaisen virheen havaitseminen alkuvaiheessa voi olla hyvinkin hankalaa, jolloin virheellisiä tuotteita voisi päästä tuotantoon saakka. Työkalujen ja niiden kiinnityksen suunnittelussa pyrittiin myös siihen, että valtaosa työkaluista olisi kiinnitettävissä yhtälailla ylä- tai alapi-timeen.

Useimmat työkalut olivat rakenteeltaan yksinkertaisia eivätkä sisältäneet liikkuvia osia. Työkalujen yksilölliset erot olivat niiden ulokkeiden mitoissa ja muodoissa. Jotkut työvaiheet kuitenkin vaativat monimutkaisempia työkaluja, jotka sisälsivät liikkuvia osia. Tällainen työvaihe oli esimerkiksi ketjun välikappaleen niittaaminen, jonka tekeminen perinteisillä työkaluilla olisi vaatinut 3 - 5 erilaista työvaihetta. Nämä työvaiheet voitiin korvata yhdellä työvaiheella sopivan työkalun avulla (liite 2).

#### **4.4 Työkalujen kiinnitys**

Sekä ylä- että alatyökalut kiinnittyvät työkalupitimiin vaakasuunnassa 10 mm:n tapilla työkalupitimissä oleviin 10,1 mm:n reikiin. Lisäksi työkalunpitimiin suunniteltiin mahdollisuus käyttää järeämpiäkin työkaluja 30 mm tapilla kiinnitettäväksi. Alapitimessä (liite 3) työkalut lepäävät pitimen päällä, mutta ylätyökalut tarttuvat yläpitimeen (liite 4) kahden supervahvan magneetin avulla. Tällöin työkalun kiinnitys on luotettava ja vaihto onnistuu nopeasti ilman työkaluja.

Ylätyökaluna voi käyttää lähes mitä vain työkalua, pois lukien akselien keskitykseen tarkoitetut työkalut. Tämän vuoksi ylätyökalupitimessä ei ole läpireikää

alapitimen tavoin. Keskitystyökaluja ei voi käyttää ylätyökaluna siitä syystä että akselin keskitykseen tarkoitetut työkalut ovat fyysisesti isompia kuin perinteiset työkalut, jolloin työkalun painokin on keskimääräistä isompi.

Yläpitimelle määritettiin kahden supermagneetin vetovoima käyttäen halkaisijaltaan pienintä mahdollista työkalua, jolloin työkalu peittää vain osan magneeteista. Vetovoima mitattiin työkaluun liitetyn vaa'an avulla. Viiden mittauksen keskiarvoksi saatiin 1 280 grammaa. Ylätyökalun kiinnittymisen varmistamiseksi määriteltiin raskaimman sallitun ylätyökalun massaksi 800 grammaa varmuuskertoimen ollessa noin 1,5.

#### **4.5 Pintakäsittely**

Koneenosien pintakäsittely ei ole välttämätöntä, sillä konetta tullaan käyttämään siisteissä sisätiloissa, eikä kone altistu kemikaaleille tai korroosiota aiheuttaville aineille. Visuaalisen ilmeen parantamiseksi koneen runko voitaisiin maalata. Lisäksi syöttöaukon reunat ja työkalunpitimien ulkoreunat voitaisiin maalata korostusvärillä koneen reunojen hahmottamisen helpottamiseksi. Työkalujen tai työkalunpitimien kiinnityspintoihin eikä männänvarteen saa laittaa maalia tai teippiä esteettömän toiminnan varmistamiseksi.



## 5 RAKENTEEN LUJUUSTARKASTELU

Rakenteen lujuustekninen tutkiminen aloitettiin jo alustavassa suunnitteluvaiheessa huomioimalla komponenttien sijoittelussa puristusvoimien välittyminen rakenteista toisiin. Rakenteeseen muodostuneet etäisyydet voimien ja niiden tukivoimien välillä pyrittiin pitämään mahdollisimman pieninä vääntö- ja taivutusjännitysten syntymisten ennaltaehkäisemiseksi. Yksittäisen palkin tai yksinkertaisen rakenteen lujuusanalyysi voidaan tehdä hyvinkin tarkasti ja todenmukaisesti analyyttisillä menetelmillä laskien.

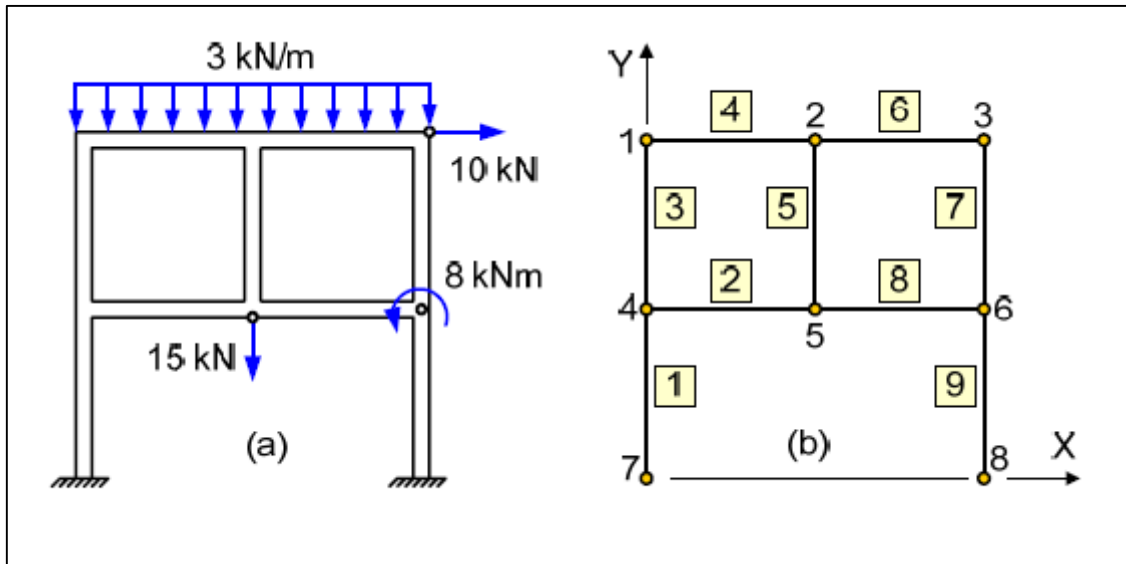
Rakenteen tai tuennan monimutkaistuessa laskenta vaikeutuu nopeasti ja rakenteesta voi tulla staattisesti määräämätön, jolloin lujuus- tai siirtymälaskenta täytyy suorittaa käyttäen numeerisia, likimääräisiä menetelmiä. Yksinkertaisten kehärakenteiden lujuustarkastelua varten kehitettyjä ohjelmia ovat muun muassa Nkehä ja QSE Space, ja 3D-mallien lujuustarkasteluita voi suorittaa 3D-mallinnusohjelmien analyysilaajennuksilla, joita on saatavilla muun muassa Solid Works-, Solid Edge- tai Catia-mallinnusohjelmiin.

### 5.1 Elementtimenetelmä

Yksi tapa ratkaista määräämättömiä rakenteita on elementtimenetelmä (FEM, finite element method), jossa rakenne määritellään koostumaan määrätyn kaltaisista elementeistä. Elementtimenetelmän tekevät mahdolliseksi tietokoneet, jotka pystyvät käsittelemään suuren määrän numerolaskumääriä kohtuullisessa ajassa.

Elementit koostuvat tyypillisesti sauvoista ja solmupisteistä, jotka yhdistävät sauvat toisiinsa. Jokaiselle solmupisteelle määritellään vapausasteiden määrä, joita voi olla enintään kuusi. Solmun vapausasteella tarkoitetaan sitä, sallitaanko solmupisteelle translaatiota x-, y- tai z-akselin suuntaan tai rotaatiota edellä mainittujen akselien ympäri. Jokaista solmun vapausastetta kohden tarvitaan niiden käyttäytymistä kuvaavat vektoriyhtälöt, joista muodostuu laskentaan tarvittavat matriisit. Toisiinsa solmupisteiden avulla kiinnittyvät elementit muo-

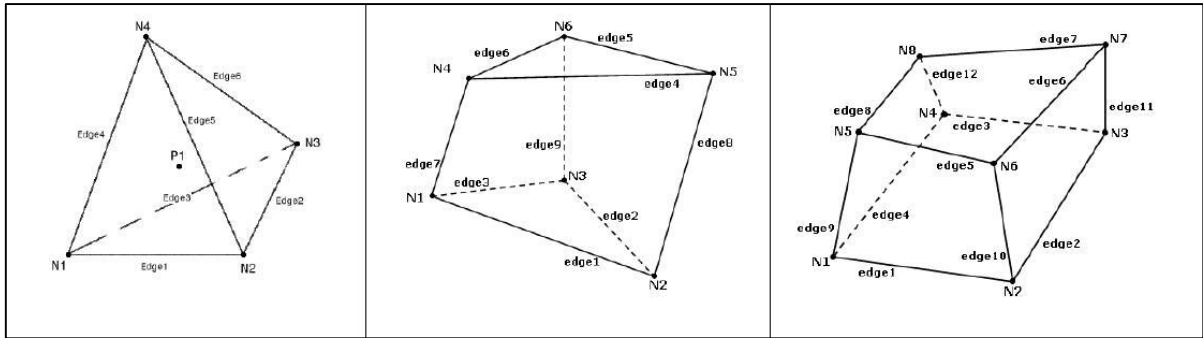
dostavat elementtiverkon. Yksinkertaiset kehärakenteet voidaan jakaa sauvaelementteihin kuvan 20 tavoin. Sauvaelementillä on kaksi solmupistettä ja niitä yhdistävä sauva. (8, s. 10 - 13 ; 9, s. 15 - 20.)



KUVA 20. Yksinkertaisen kehärakenteen elementtiverkko, paljaat numerot kuvaavat solmupisteitä ja kehystetyt numerot elementtejä (8, s. 3)

Kolmiulotteisen kappaleen elementtijako voidaan suorittaa hyvin monella tapaa. Elementit voivat olla neli-, viisi- tai kuusikulmaisia ja muodoltaan tetraedrin, kii-  
lan tai tiilikiven muotoisia. Lisäksi elementtien reunapinnat voivat olla tasoja, jolloin elementtiä nimitetään lineaarisiksi elementiksi, tai kaarevia toisen asteen tasoj, jolloin elementti on kvadraattinen tai parabolinen. Sauvaelementtien tavoin 3D-elementit kiinnittyvät toisiinsa solmupisteiden avulla. (8, s. 10.)

Kuvassa 21 esitetään esimerkkejä lineaarisista 3D-elementeistä. Kyseisistä elementeistä saadaan kvadraattisia tai parabolisia elementtejä lisäämällä jokaisen solmupisteen välisen särmän keskelle solmu. Tällöin etenkin pyöreiden muotojen laskentatarkkuus paranee merkittävästi, jolloin kappaleen tilavuus voidaan "täyttää" elementeillä paremmin kuin käytettäessä lineaarisia elementtejä. Haittapuolena on solmujen moninkertaistuminen, mikä puolestaan lisää laskettavien yhtälöiden määrää ja hidastaa laskennan suorittamista.



*KUVA 21. Esimerkkejä solidirakenteiden 3D-elementeistä, n-kirjaimella kuvataan solmupisteitä (Node) (10, s. 4 - 9)*

Tulosten tarkkuuteen ja laskennan määrään vaikuttaa merkittävästi myös elementtien koko. Isojen elementtien käyttäminen yleisesti nopeuttaa laskutoimitusta, mutta lisää laskennan epätarkkuutta. Elementtien ei välttämättä tarvitse olla samankokoisia tutkittavassa elementtiverkossa. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää siten, että muodostetaan kriittisiksi arvioituihin kohtiin tiheämpi verkko kuin epäoleellisille alueille. Tutkittavan kappaleen eri alueiden priorisoinnin arviointia varten kappaleelle voidaan suorittaa ensin karkea analyysi, jonka perusteella muodostetaan uusi elementtiverkko ensimmäistä laskentaa tarkempaa analyysia varten.

Laskennan perusteella saaduista tuloksista voidaan arvioida kappaleeseen vaikuttavien voimien aiheuttamia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Tämän työn yhtenä tarkoituksena oli tutkia laskenta-analyysin todenmukaisuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä todellisilla rakenteen kuormitusmittauksilla.

## 5.2 FEM-analyysi

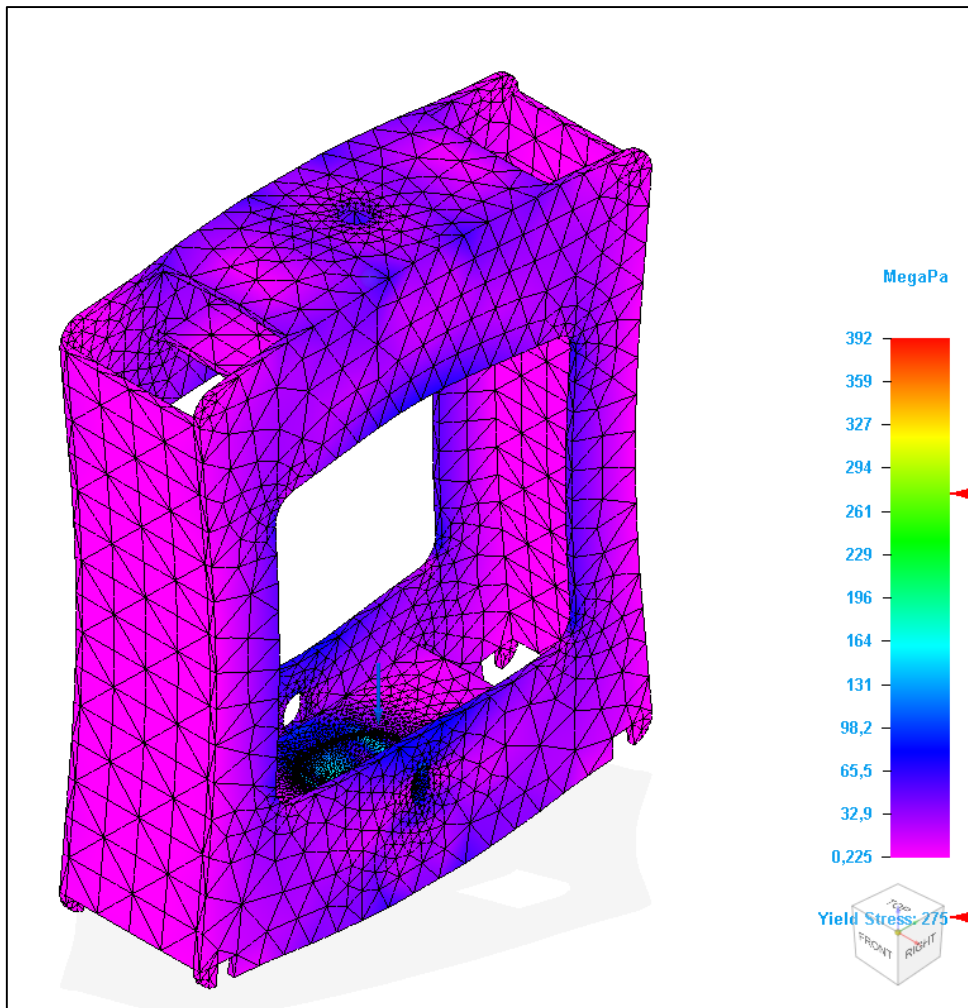
Rakenteen lujuusanalyysi suoritettiin Solid Edge Simulation -ohjelmistolla. Kokoonpanoa muokattiin analyysia varten siten, että siitä poistettiin sylinteri, sylinterin kiinnitystarvikkeet, työkalunpitimet ja rungon pystyssä pitävät huonekaluputkesta tehdyt poikkipalkit. Poistetut rakenteet eivät olisi vaikuttaneet oleelli-

sesti rungon lujuusanalyysiin, mutta ylimääräisinä komponentteina olisivat turhaan hidastaneet laskentaa. Muotoulokeliitoksista poistettiin välykset, jotta kappaleiden välisten liitosten määrittäminen olisi helpompaa.

Kokoonpanosta luotiin part copy -toiminnon avulla yksi osa, josta geometry inspector -toiminnon avulla etsittiin ja poistettiin terävät kulmat ja rakenteeseen jääneet välykset. Runkoon määriteltiin ylä- ja alatasoihin sellaiset alueet, jotka vastasivat ylätyökalupitimen ja hydraulisylinterin pinta-aloja. Näihin alueisiin määriteltiin rungon tuenta ja puristustyön rakenteisiin synnyttävä voima. Rungon elementtiverkon määrittely aloitettiin laatimalla hyvin karkea verkko ja verkon elementtirakenteeksi valittiin yleisimmin 3D-rakenteiden analysointiin käytetty lineaarinen tetraedri.

Rakenteelle suoritettiin ensimmäinen analyysi käyttäen 100 kN:n suuruista voimaa. Analyysin perusteella elementtiverkon tiheyttä säädettiin siten, että paikoissa joissa jännitys oli suurta, verkon tiheyttä lisättiin tarkkuuden lisäämiseksi ja vastaavasti epäolennaisista paikoista verkon tiheyttä pienennettiin laskennan nopeuttamiseksi. Tätä toistettiin, kunnes elementtiverkon arvioitiin kuvaavan mallia riittävän hyvin. Ohjelma ilmoitti analyysin perusteella kappaleesta siirtymän millimetreinä sekä Von Mises -jännityksen megapascalina.

Elementtiverkon hyväksynnän jälkeen laskenta suoritettiin uudestaan ja rakenteesta tutkittiin jännitysten lisäksi probe-työkalun avulla rakenteiden siirtymiä valituista mittapisteistä todellisten siirtymien vertailuja varten. Kuvassa 22 esitetään hyväksi todetun elementtiverkon mukainen jänniteanalyysi, kun puristinta kuormittavaksi voimaksi määriteltiin 100 kN. Rakenteelle suoritettiin analyysit myös hyvin tiheitä elementtiverkkoja käyttäen, mutta tarkkuuden lisäämisen vaikutus syntyviin jännityksiin ja muodonmuutoksiin nähden oli vähäistä laskennan hidastumiseen verrattuna.



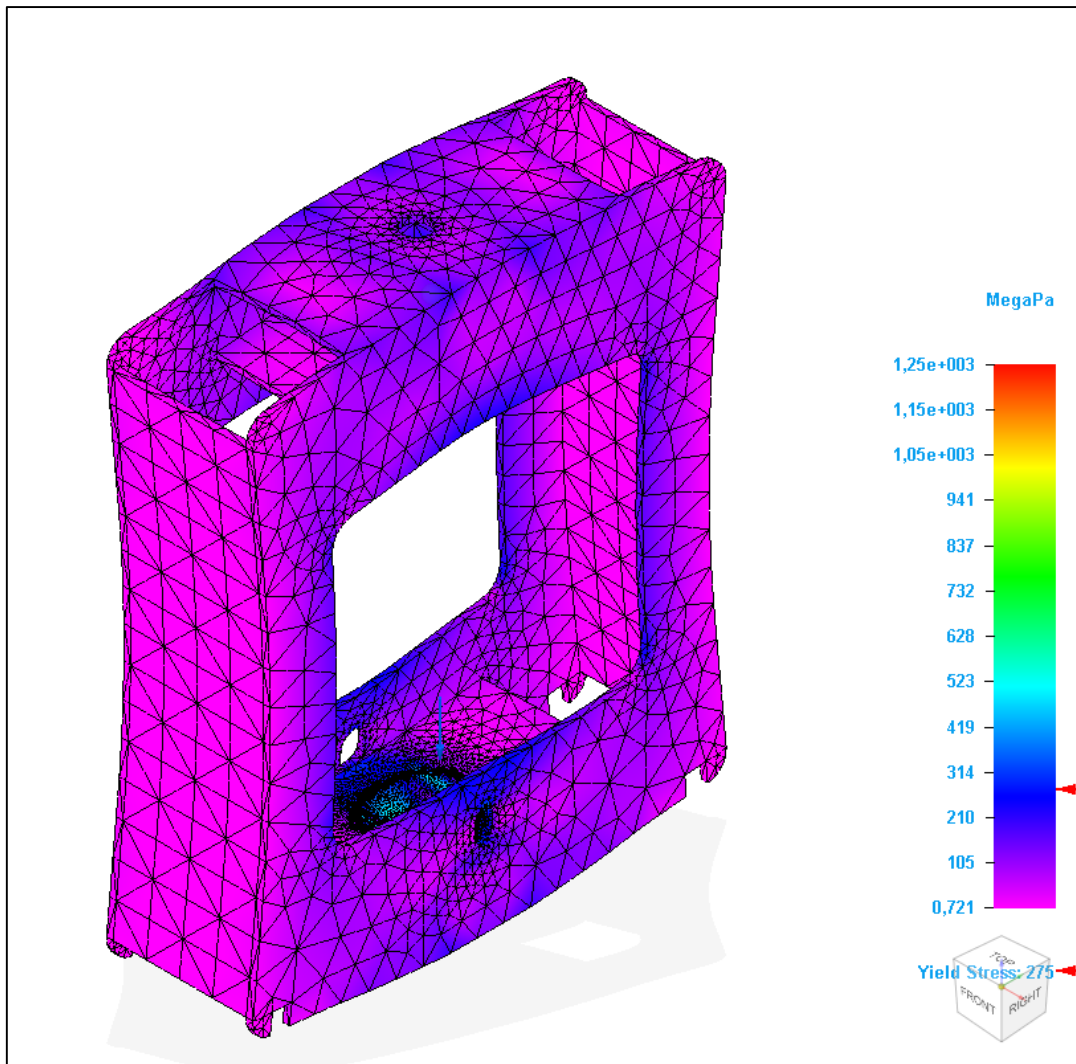
KUVA 22. Rakenteeseen syntyvät jännitykset 100 kN:n voimalla

Rakenteen suurimmat jännitykset syntyivät hydraulisylinterin ja ylätyökalunpiti-  
mien vastinpintoihin. Jännityksen maksimiarvo 100 kN:n voimalla oli jopa 392  
MPa, ja jännityshuippu sijaitsi vastinpinnassa olevan sisäreiän kulmassa. Suurin  
jännitys oli kuitenkin niin pienellä alueella epäolennaisessa kohdassa, että se  
jätettiin huomioimatta. Simulointimallissa levyjen liitokset olivat täysin jäykkiä,  
mutta todellisuudessa yhdestä reunastaan kiinni hitsatut liitokset sallisivat hie-  
man joustoa. Rakenteen joustaminen tasaisi sisäisten jännitysten jakautumista  
pienentäen jännityshuippuja.

Etu- ja takakehikoissa ei esiintynyt 100 kN:n voimalla vielä merkittäviä jännityk-  
siä, mutta analyysin perusteella havaittiin, että hydraulikkaletkua varten tehty  
reikä lisää merkittävästi rakenteeseen syntyvän jännityksen suuruutta. Tämä

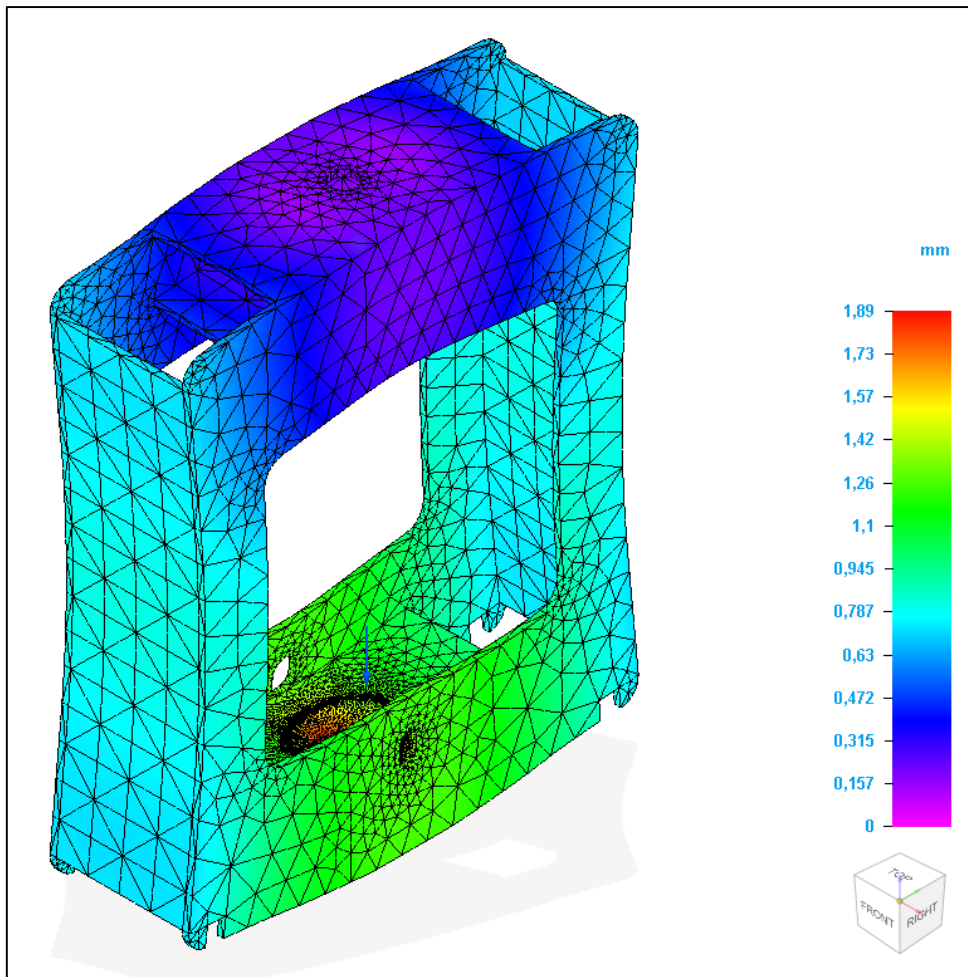
tuki alustavassa suunnittelussa tehtyä päätöstä tehdä reikä molempiin päätyihin, jolloin rakenteen reiästä aiheutuva joustaminen ei aiheuttanut epäsymmetrisiä jännityksiä ja muodonmuutoksia rakenteeseen. Ilman reikää etukehikoissa hydraulikkaletku olisi pitänyt viedä sivukautta ulos, jolloin se olisi rakenteen sisällä kulkiessaan altistunut putoavien kappaleiden aiheuttamille vaaratilanteille. Rakenteelle tehtiin jännitysanalyysit portaittain 320 kN voimaan asti.

320 kN:n voimalla puristettaessa rakenteeseen alkoi syntyä jo merkittäviä jännitysrasituksia. Kuvassa 23 pinkillä värillä kuvattuihin rakenteisiin kohdistui noin 105 MPa:n suuruinen jännitys ja tummansinisellä värillä kuvatuista osista suurin jännitys 230 MPa kohdistui hydraulikkaletkun reiän yläpuolella olevaan kannakseen. Suurimmat jännitykset sijaitsivat aiempien tapausten tavoin samoissa paikoissa vastinpintojen keskireikien sisäpinnoilla, mutta ne olivat suuruudeltaan jo moninkertaisesti yli materiaalin murtorajan. Rakenteesta kokeiltiin poistaa reiät vastinpinnoilta, jolloin ylisuuret jännityspiikit jäivät syntymättä.



KUVA 23. Rakenteeseen syntyvät jännitykset 320 kN:n voimalla

Hitsien mitoitusta varten rakenteen liitoskulmista poimittiin suurimpia jännitysten arvoja. Siirtymäkuvaajia tutkiessa havaittiin, että rakenteen siirtymät olivat verrattain pieniä siihen nähden, että rakenteen murtolujuus ylittyi paikoin moninkertaisesti. Tämä havainto vahvisti ajatusta siitä, että maksimijännityspiikit olivat hyvin paikallisia eivätkä siten vaikuttaneet merkittävästi koko rakenteeseen. Siirtymäkuvaajassa nollassa on sijoitettu ylätyökalun kiinnityspisteeseen, jolloin siirtymäanalyysi ilmoitti hydraulisylinterin kiinnityslevyn keskireiän kulmissa suurimmaksi siirtymäksi 320 kN:n voimalla 1,89 mm. (Kuva 24.)



KUVA 24. Rakenteen siirtymät 320 kN:n voimalla

Rakenteeseen syntyi kuormitusanalyysissä erittäin suuria yksittäisiä jännityspiikkejä, mutta keskimääräiset rakenteen kulmiin ja pääkomponentteihin syntyvät jännitykset pysyivät kuitenkin materiaalille määritettyjen rajojen alapuolella. Analyysin perusteella arvioitiin, että rakenne sellaisenaan kestäisi siltä vaaditun 300 kN staattisen voiman aiheuttamat jännitykset.

Huolimatta erittäin suurista yksittäisistä jännityspiikeistä, keskimääräisten rakenteen kulmiin ja pääkomponentteihin tulevien jännitysten suuruuksien perusteella arvioitiin tässä vaiheessa, että rakenne kestäisi siltä vaaditun 300 kN staattisen voiman aiheuttamat jännitykset.



### 5.3 Hitsin mitoitus

Puristimen rakenteessa kaikki yksittäiset komponentit ovat staattisesti määräämättömiä, koska kappaleet liitetään toisiinsa useista kohdista ja rakenteiden taipuessa ne jakavat syntyviä jännityksiä epämääräisellä tavalla. Alle 16 mm paksuiselle S355-materiaalista valmistetulle teräslevylle ilmoitetaan SFS 2373 -standardin mukaiseksi suurimmaksi sallituksi vertailujännityksen arvoksi 145 MPa, jonka alle hitsin suurimman jännityksen täytyy jäädä. Puristimen rakenteessa kaikki hitsausliitokset olivat pienaliitoksia, joille voidaan laskea staattisesti epämääräisen hitsiliitoksen mitoitusjännitys  $\sigma_z$  käyttäen kaavaa 4. (11, s. 19 - 27.)

$$\sigma_z = 0,7 * \sigma_{wsall}$$

KAAVA 4

Kun kaavaan sijoitetaan vertailujännityksen  $\sigma_{wsall}$  arvo 145 MPa, saadaan selvitettyä laskentaan tarvittava mitoitusjännitys.

$$\sigma_z = 0,7 * 145 \text{ MPa} = 101,5 \text{ MPa}$$

Lujuusanalyysistä havaittiin oletettujen hitsisaumojen kohdalta suurimmillaan 160 MPa:n suuruisia yhdistetyn jännityksen arvoja, joita päätettiin käyttää hitsin mitoitukseen niiden ollessa materiaalin laskennallista mitoitusjännitystä suurempia. Hitsin a-mitta voidaan määrittää käyttämällä kaavaa 5 (11, s. 28).

$$a \geq \frac{\sigma_z * s}{2 * \sigma_{wsall}}$$

KAAVA 5

Kun kaavaan sijoitetaan ainevahvuudeksi s 10 mm sekä edellä määritetyt arvot, saadaan laskettua hitseissä käytettävä a-mitta.

$$a \geq \frac{160 \text{ MPa} * 10 \text{ mm}}{2 * 145 \text{ MPa}}$$

$$a \geq 5,51 \text{ mm}$$

Kaavasta 5 saatujen tuloksien mukaan a-mitaltaan 5,51 mm sauma riittäisi hittiin kohdistuvan jännityksien ollessa lujuusanalyysin perusteella saadun 160

MPa:n suuruinen. Saatua a-mittaa päätettiin korottaa varmuuskertoimella 1,5, jolloin lopulliseksi hitsin a-mitaksi ylöspäin pyöristettynä valittiin 8,5 mm.

## 6 KONEEN VALMISTUS JA KOKOONPANO

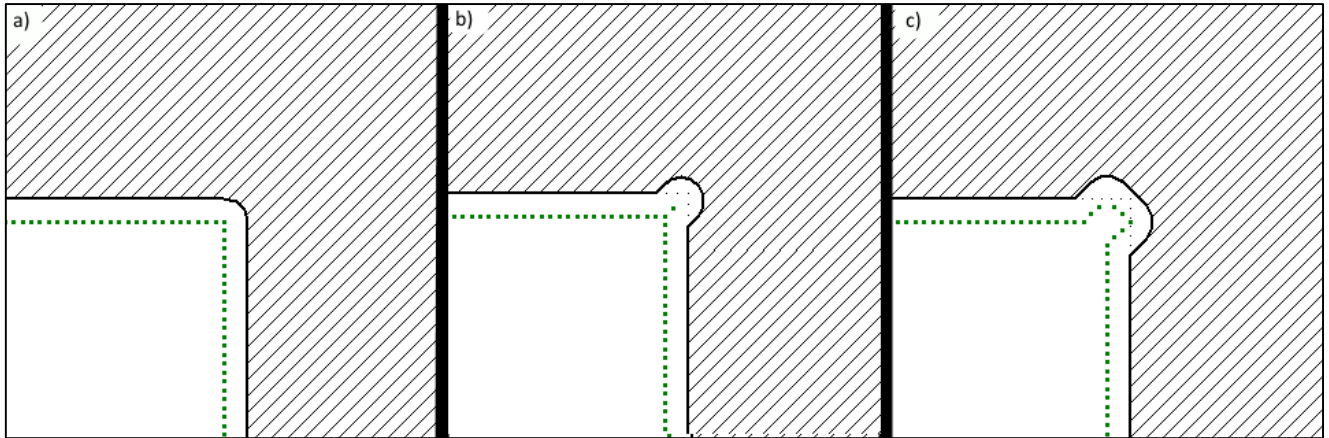
Koneen suunnittelun viimeisessä vaiheessa pyrittiin käymään läpi asioita, jotka voisivat helpottaa koneen valmistettavuutta tai kokoonpantavuutta. Koneeseen tulevat komponentit päätettiin tilata toimittajalta, joka on toimittanut yrityksen tuotannossa oleviin koneisiin tulevia levyosia. Tilaajalle täytyi laatia komponenteista työpiirustukset ja toimittaa mallinnusohjelmalla luotu tiedosto laserleikkurin liikeratojen ohjelmointia varten.

### 6.1 Valmistuksen ja kokoonpantavuuden huomiointi

Laserleikkaus menetelmänä soveltuu hyvin monien materiaalien ja muotojen leikkaukseen. Yhtenä menetelmän haittana on kuitenkin lasersäteen pyöreän muodon aiheuttama kulmiin syntyvä railon leveydestä riippuva pyöristys. Kyseiselle materiaalille 10 mm paksuisesta levystä leikatusta koeleikkauspalasta mitattiin kulmaan syntyvän pyöristyksen olevan 0,7 mm.

Suuri sisäkulman pyöristys haittaisi ulokkeiden asentamista, sillä ulokkeisiin oli detaljisuunnitteluvaiheessa mitoitettu vain 0,2 mm kokonaisvälys, jolloin yhdelle puolelle jääväksi välykseen jäisi vain 0,1 mm. Jotta pyöristys ei haittaisi kokoonpanoa lainkaan, täytyisi kokonaisvälykseksi mitoittaa 1,4 mm, mikä kasvattaisi kokoonpanovaiheen mittaepätarkkuusriskiä merkittävästi. Koska puristinta tuotettiin vain yksi kappale, päätettiin ongelmakohtien kulmat pyöristää hiomakoneella ennen kokoonpanoa.

Sarjatuotteessa osien yksittäinen työstäminen ei kannattaisi, vaan syntyvä pyöristys täytyisi eliminoida muilla konsteilla. Lisäämällä kappaleen sisäpuolisiin kulmiin pieni väiste voitaisiin tahattoman pyöristyksen aiheuttama haitta torjua. Kuvassa 25 esitetään kohdassa a kulman leikkautuminen, jos kulmaan ei mallinneta väistettä. Vihreä katkoviiva kuvaa laserleikkurin kulkulinjaa. Kuvan 25 kohdissa b ja c esitetään vaihtoehtoisia menetelmiä kulman leikkaukseen, jolloin leikkaussäteen aiheuttama pyöristys ei aiheuta ongelmia liitoksien asennukseen.



KUVA 25. a) Kulman leikkautuminen suoralla leikkauslinjalla, b) ja c) kulman leikkautuminen erilaisilla väisteillä

## 6.2 Osapiirustusten luonti

Osapiirustukset luotiin yksitellen jokaisesta osasta käyttäen samaa mallinnusohjelmaa kuin osien suunnittelussa ja mallinnuksessa käytettiin. Tavarantoimittajan ohjeistuksen mukaan kappaleisiin ei mitoitettu jokaista erillistä mitta, vaan piirustuksiin tuli lisätä ainoastaan kappaleiden ulkomitat, levypaksuus sekä mitat, joita käytetään tuotteen lopputarkistukseen. Rungon kappaleiden osapiirustukset ovat liitteessä 5.

## 6.3 Komponenttien tilaus

Komponenttien tilausta varten jokaisesta tilattavasta kappaleesta luotiin mallinnusohjelmalla DXF-tiedosto, joka sisältää kappaleen piirteet. Tätä tiedostoa käytetään työstöratien luontiin. Työstöradat voitaisiin vaihtoehtoisesti luoda manuaalisesti työpiirustuksen pohjalta, mutta tämä olisi hyvin aikaa vievää ja turha toimenpide, sillä työstökeskuksen kääntäjäohjelma osaa luoda DXF-tiedostosta työstöradat automaattisesti. Työstökoneen käyttäjä voi tehdä tarvittaessa muutoksia tai optimointeja työstöratoihin.

DXF-tiedoston lisäksi kappaleista toimitettiin PDF-versiot työpiirustuksesta, joita työstökoneen käyttäjä tarvitsee esimerkiksi aihion valintaa ja lopputarkastusta varten. Lisäksi komponenteista laadittiin Excel-taulukko, josta ilmenivät komponenttien yksilöityjen nimi- ja numerotietojen lisäksi valmistusmäärät ja materiaali.

## **6.4 Komponenttien tarkistus ja kokoonpano**

Valmiille komponenteille suoritettiin pikainen tarkistus, jossa varmistettiin komponenttien kriittisten mittojen mittatarkkuus. Tarkistuksessa ei havaittu valmistusvirheitä tai muita puutteita.

Kokoonpano suoritettiin tämän opinnäytetyön laatijan toimesta Xemec Oy:n prototyypilaboratoriossa. Muotoulokkeiden urospuolien kulmia pyöristettiin valmistettavuuden tarkistusvaiheessa tehtyjen huomioiden perusteella hiomakoneella. Kappaleet liitettiin toisiinsa työpiirustusten mukaan ja liitosten kohtisuoruus hitsauksen aikana varmistettiin mittauksien, ruuvipuristimien ja magneettipitimien avulla. Ennen hitsausta materiaalille suoritettiin koehitsauksia, jossa varmistettiin hitsikoneen parametrien sopivuus materiaalille ja valitulle ainevahvuudelle. Hitsauksen jälkeen koneeseen ruuvattiin paikoilleen sylinterin keskitysrengas ja ylätökalu. Sylinteri asennettiin paikoilleen ja siihen liitettiin koneikko hydraulikkaletkulla.

## 7 FEM-ANALYYSITULOSTEN JA TODELLISTEN MITTAUSTEN VERTAILU

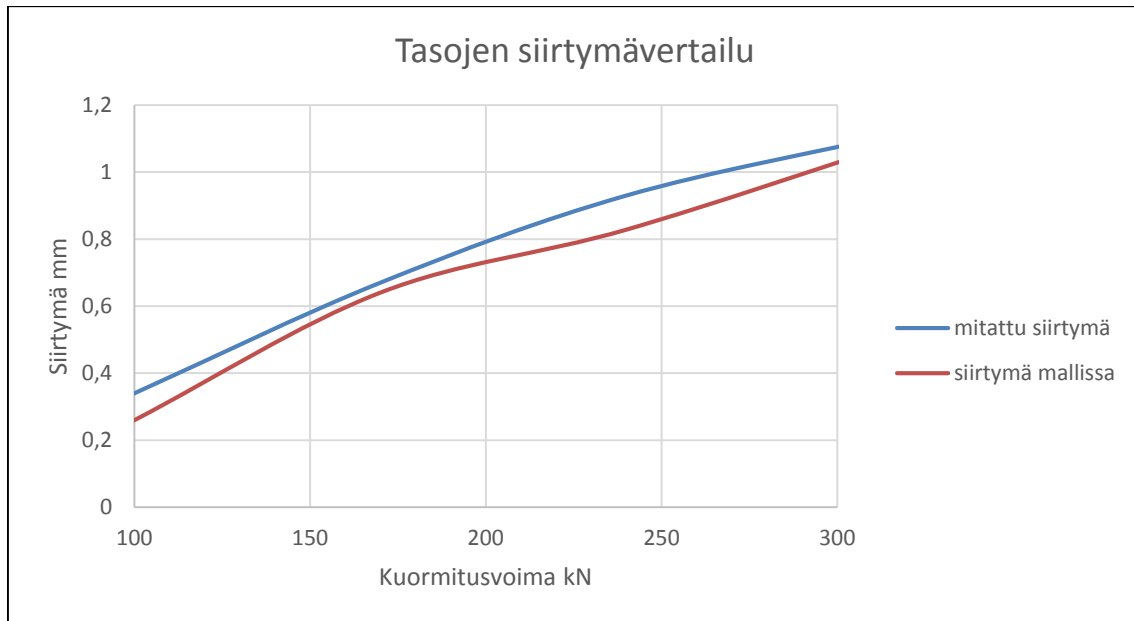
Rakenteesta valittiin kolme sellaista pisteparia, joiden avulla muodonmuutosten mittaaminen onnistuisi todellisesta rakenteesta kuormitustilanteessa. Näistä pisteistä mitattiin 100, 170, 240 ja 320 kN suuruisten voimien aiheuttamat siirtymät. Hydraulisylinlerin ja ylätyökalunpitimen väliin asetettiin 100 mm terästangosta leikattu pätkä, jolloin hydraulisylinlerin avulla saatiin kuormitettua rakennetta halutulla tavalla. Rakenteen sisäpintoihin asetettiin vastakkain kaksi magneettijalalla varustettua statiiivia ja toiseen kiinnitettiin heittokello, jonka mittapää oli toisen statiivin kärjessä kiinni.

Kuvassa 26 esitetään mittaustilanne, jossa tutkitaan ylätyökalunpitimen ja hydraulisylinlerin alustojen etäisyyden muutosta. Rakenteeseen syntyvät muodonmuutokset voitiin lukea heittokellon mittarista. Heittokellon avulla siirtymä voitiin mitata hyvin luotettavasti, mutta painemittarin karkean asteikon takia kuormitusvoima saattoi poiketa hieman todellisesta aiheuttaen virhettä mittauksiin.



*KUVA 26. Jännityksen aiheuttamien muodonmuutoksien mittausjärjestely*

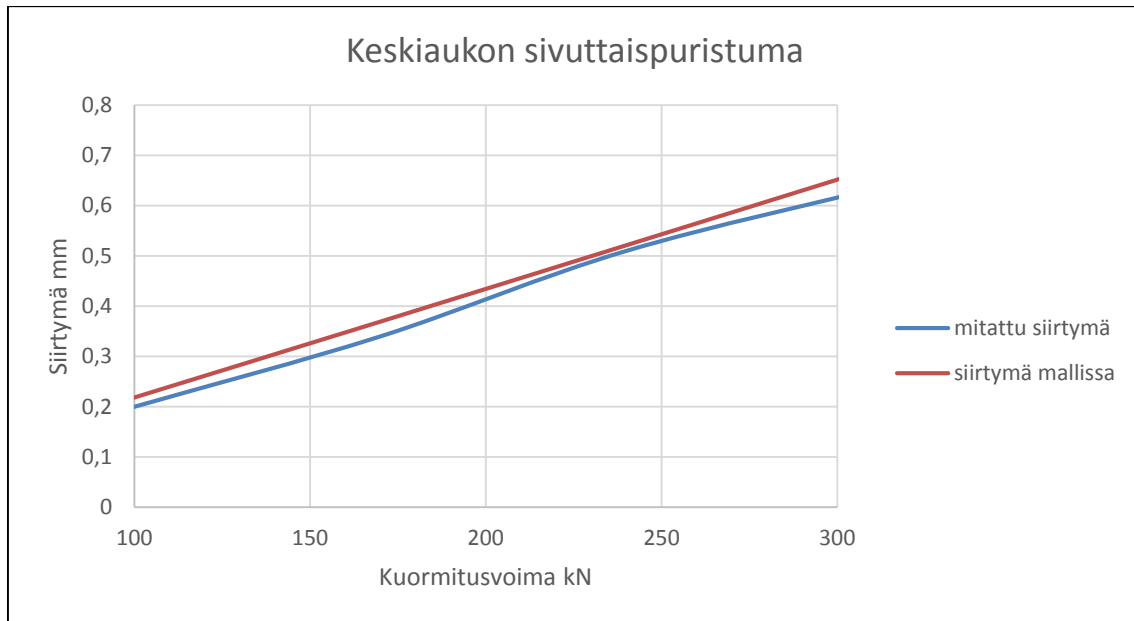
Rakennetta kuormitettiin sylinterin avulla 300 kN:iin asti ja kirjattiin heittokellon lukemat muistioon. Kuvassa 27 esitetään rakenteen ylä- ja alatasojen etäisyyden muutos kuormitusvoiman funktiona. Mittalaitteita ei voitu sijoittaa levyjen keskipisteeseen sylinterin ja työkalunpitimien sijainnin takia, joten ne sijoitettiin 130 mm keskipisteestä sivuun kuvan 26 tavoin. Todellinen siirtymä oli hieman lujuusanalyysin perusteella saatuja arvoja suurempi, mutta tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan. Suurin tulosten välillä havaittu poikkeama 0,108 mm ilmeni 240 kN kuormitusvoiman kohdalla.



*KUVA 27. Ylä- ja alatasojen etäisyyden muutos kuormitustilanteessa.*

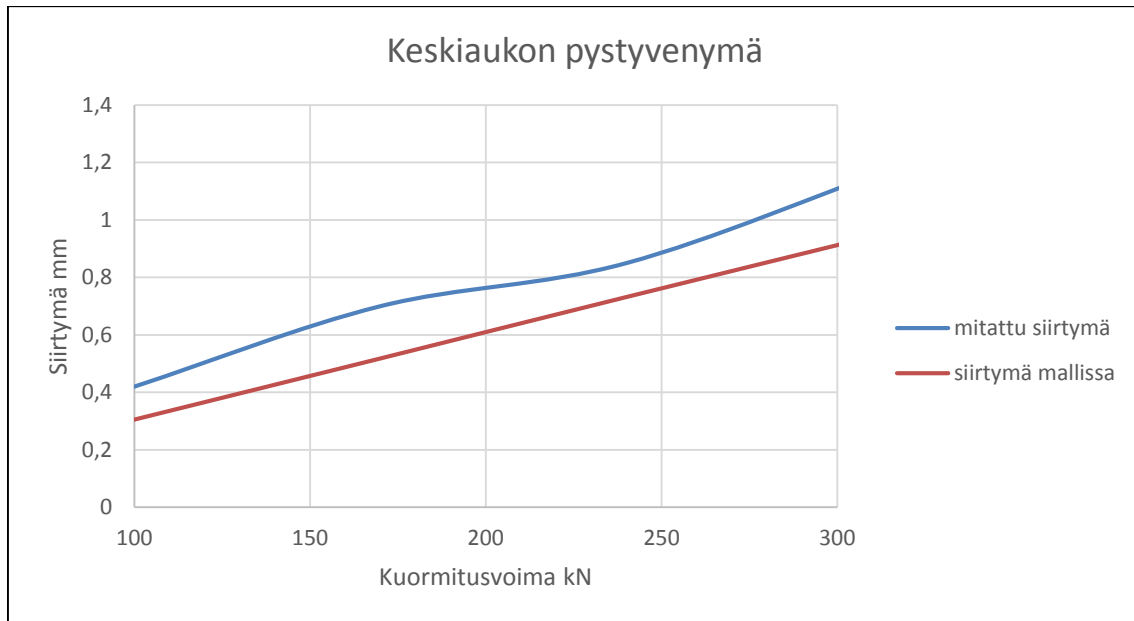
Toisiksi mittapisteiksi valittiin etukehikossa sijaitsevan työskentelyaukon keskellä sijaitsevat vastakkaiset sisäreunat. Rakenteeseen syntyneet muodonmuutokset esitetään kuvassa 28. Edellisen mittauksen tavoin mittatulokset osuivat hyvin lähelle analyysituloksia. Pienin tulosten välillä havaittu poikkeama 0,011 mm ilmeni 240 kN:n kohdalla, missä edellisessä mittauksessa havaittiin suurin poikkeama. Suurin 300 kN:n kohdalla havaittu poikkeama tässä mittauksessa jäi vain 0,045 mm suuruiseksi.





*KUVA 28. Etukehikossa sijaitsevan keskiaukon puristuma sivuttaissuunnassa kuormitustilanteessa*

Kolmas mittaus suoritettiin samasta keskiaukosta kuin edellinen, mutta mittalaitteet sijoitettiin keskiaukon vaakasuuntaisten leikkausten kohdalle mittaamaan aukon pystysuuntaista venymää. Tässä mittauksessa havaittiin muita mittauksia suurempia poikkeamia, mutta ero pysyivät edelleen pieninä suurimman poikkeaman ollessa 300 kN:n kohdalla 0,227 mm.



*KUVA 29. Etukehikossa sijaitsevan keskiaukon pystysuuntainen venymä kuormitustilanteessa*

## 8 KÄYTTÖ JA TURVALLISUUS

Valmistettua hydraulista puristinta saa käyttää vain sellainen henkilö, joka on saanut opastuksen koneen käyttöön ja on ymmärtänyt koneen käyttöön liittyvät vaaratekijät. Lisäksi koneen käyttäjän täytyy käyttää vaadittuja henkilösuojaimia sekä tietää, miten toimia vaara- ja vikatilanteissa. Kone täytyy tarkastaa viikoittain vuotojen tai muiden vaurioiden varalta. Mikäli koneen rakenteessa tai hydraulisen järjestelmän osissa havaitaan vaurioita, täytyy käyttö lopettaa välittömästi. Puristimen ympäristö täytyy pitää puhtaana, jotta mahdolliset öljyvuodot havaitaan mahdollisimman nopeasti.

Koneella tapahtuva puristustyö suoritetaan kyseisen työvaiheen kokoonpanopiirustuksen mukaisilla ohjeilla. Kokoonpanopiirustuksessa ilmoitettua puristusvoimaa ei saa koskaan ylittää, eikä koneeseen saa tehdä rakenteellisia muutoksia suurimman puristusvoiman kasvattamiseksi. Työkalujen pudottaminen tai väärinkäyttö voi aiheuttaa työkalun rikkoutumisen. Vaurioituneet työkalut täytyy välittömästi poistaa käytöstä ja vaurioitumisen aiheuttanut syy täytyy selvittää ja kirjata muistiin.

Puristustyö aloitetaan asettamalla puristimen väliin jokin jäykkä kappale, jota puristamalla saadaan säädettyä työntövoima paineensäätölaitteesta työvaiheen mukaiseksi. Tämän jälkeen asetetaan kokoonpanopiirustuksessa ilmoitetut työkalut ylä- ja alapitimiin sekä varmistetaan työkalujen oikea kiinnittyminen.

Pieniä kappaleita puristettaessa alapitimiä voidaan pinota päällekkäin, jolloin sylinterin iskunpituus riittää suorittamaan puristustyön. Toisiinsa liitettävät kappaleet asetetaan työkalupitimiin, varmistetaan niiden kohdistus ja suoritetaan puristusliike kääntämällä säätökahvaa myötäpäivään. Säätökahva vapautetaan, kun painemittarin viisari saavuttaa sille asetetun arvon. Sylinteri palautuu automaattisesti ala-asentoon ja työkalukappale voidaan poistaa puristimesta.

## 9 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä perehdyttiin koneenrakennukseen liittyvään ajankohtaiseen lainsäädäntöön, jonka pohjalta suunniteltiin vaatimusten mukainen hydraulinen puristinlaitteisto. Työn suorituksen aikana arvioitiin ja analysoitiin suunnittelussa käytettyjä menetelmiä sekä vertailtiin lopulliselle tuotteelle tehtyjä kuormitustestejä tietokoneavusteisen lujuuslaskennan avulla saatuihin tuloksiin. Työ tarjosi erinomaisen mahdollisuuden koneensuunnittelu- ja tuotekehitystaitojen kehitykseen, sillä itse suunniteltujen osien kokoonpano ja testaus antoivat parhaan mahdollisen palautteen niiden valmistettavuudesta ja toimivuudesta.

Suunnittelun alkuvaiheessa tukeuduttiin vahvasti lainsäädäntöön ja työkaluista aiheutuviin rajoituksiin. Rakenteen hahmottelun jälkeen paino siirtyi kehellisiin menetelmiin, joita tehtiin 3D-malliin virtuaaliympäristössä ja todelliseen rakenteeseen tarkkuusmittalaitteiden avulla. Kokoonpanon ja mittausten jälkeen puristimella suoritettiin sille määriteltyjä asennustehtäviä onnistuneesti.

Solid Edgen simulointilaajennus osoittautui hyvin tehokkaaksi työkaluksi rakenteen suunnitteluvaiheessa. Lujuusanalyysin perusteella rakenteesta voitiin havaita sen heikkoudet sekä määritellä suurimmat sallitut rakenteen kuormitusvoimat. Solid Edge selviytyi simuloinneista kohtalaisen lyhyessä ajassa, minkä ansiosta lujuusanalyysityökalujen säätöjä pystyttiin laajasti kokeilemaan ja arvioimaan niiden vaikutuksia laskentatuloksiin. Todellisesta rakenteesta mitattujen siirtymien perusteella voitiin todeta simulointityökalu nopeutensa lisäksi hyvin tarkaksi, sillä poikkeamat analyysin ja mittausten välillä olivat verrattain pieniä.

Suunnitteluprosessi eteni johdonmukaisesti, ja suunnittelun tuloksena saatiin valmistettavissa oleva laite, joka pystyi toteuttamaan sille asetetut tavoitteet. Sekä suunnittelutyö että kirjallisen raportin laatiminen pysyivät niille asetetuissa aikatauluissa.

Puristin päättyi suunnitellusti osaksi Xemec Oy:n sarjatuotantolinjaa, ja sen kehitystyö jatkuu edelleen lähinnä uusien työvaiheiden vaatimien työkalujen suunnittelutyönä. Mikäli sarjatyökäytössä havaitaan puutteita tai parannusmahdolli-

suuksia, pyritään niitä toteuttamaan mahdollisuuksien mukaan. Puristimen runkoon on mitoitettu tila myös pitkäiskuisemmalle sylinterille, jonka käyttöä ei tässä työssä selvitetty. Jatkokehitysmahdollisuuksia olisi vaihtoehtoisen sylinterin käyttöönotto tai käsikäyttöistä paineensäädintä nopeamman sähköohjatun säätimen suunnittelu.

## LÄHTEET

1. 12.6.2008/400. Valtioneuvoston asetus koneiden turvallisuudesta. Finlex. Lainsäädäntö. Ajantasainen lainsäädäntö. Saatavissa: [www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2008/20080400](http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2008/20080400). Hakupäivä 20.11.2014.
2. Koneturvallisuus: säädökset ja soveltaminen. 2002. Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö. Tampere: Pk-Paino Oy.
3. SFS-EN 693+A2. 2011. Metallintyöstökoneet. Turvallisuus. Hydrauliset puristimet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
4. SFS-EN 349 +A1. 2008. Koneturvallisuus. Vähimmäisetäisyydet kehonosien puristumisvaaran välttämiseksi. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
5. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja. 2011. Teknologiateollisuus Ry. Tampere: Tammerprint Oy.
6. Tekniikan kaavasto. 2000. Tampere: Tammertekniikka Oy.
7. Leskinen, Juhani – Konttinen, Uolevi – Rytty, Henrik – Hietala, Veijo – Liede, Jaakko – Ylinen, Arvo 1973. Tekniikan käsikirja 8. Kahdeksas uusittu ja lisätty painos. Jyväskylä: Gummerus Oy.
8. Lähteenmäki, Matti. Elementtimenetelmän perusteet. Verkkojulkaisu. Saatavissa: <http://personal.inet.fi/koti/mlahteen/arkistot/>. Hakupäivä 4.12.2014.
9. Hakala, Matti 1986. Lujuusopin elementtimenetelmä. Espoo: Otapaino.
10. Kontio, Esa. Elementtimenetelmät. Solidirakenteet. Opintojakson T310703\_FEM\_k13 verkkomateriaali Optimassa. Oulun ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://optima.oamk.fi/learning/id6/bin/user?rand=49764>. Hakupäivä 4.12.2014.

11. Blom, Seppo – Lahtinen, Pekka – Nuutio, Erkki – Pekkola, Kari – Pyy, Seppo – Rautiainen, Hannu – Sampo, Arto – Seppäen, Pekka – Suosara, Eero 2006. Koneenelimet ja mekanismit. 5. - 6. painos. Helsinki: Edita Prima Oy.

## LIITTEET

### Liite 1 Paineensäätimen valmistuspiirustukset

- Paineensaadin TL-113A
- Paineensaatimen kara TL-114A
- Paineensaatimen vastin TL-115A

### Liite 2 Ketjuniittaimen valmistus- ja kokoonpanopiirustukset

- Ketjuniittaimen käyttö
- Ketjuniittain\_a JG-242S1
- Ketjuniittain\_b JG-243 S1
- Ketjuniittain\_c JG-244 S1
- Ketjuniittain\_d JG-245 S1

### Liite 3 Alatyökalupitimen (sovitinholkki) valmistuspiirustus

### Liite 4 Ylätyökalupitimen (ylavastin) valmistuspiirustus

### Liite 5 Rungon valmistuspiirustukset

- Kehikko TL-101A
- Pohjalevy TL-102A
- Paikoituskiekkö TL-104A
- Alalevy TL-105A
- Valituki TL-107A
- Ylalevy TL-108A2
- Sivutuki TL-109A
- Ylatuki TL-112A



*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*



*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*



*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*

*Valmistus- tai kokoonpanopiirustuksia ei ole sisällytetty julkaistavaan versioon*